مدخل إلى هندسة التأريض

١ - ١ مقدمة

يصنف المهندسون التأريض عادة إلى صنفين أساسيين يندرج تحت كل منهما أقسام أو أنواع فرعية من التأريض، تأريض المنظومة والتأريض الوقائي. يُقصد بتأريض المنظومة إيجاد اتصال بين الموصلات الحاملة للتيار والأرض في نقطة أو أكثر من منظومة القوى الكهربية. ويُقصد بالتأريض الوقائي إيجاد اتصال بالأرض مع الأجزاء المعدنية غير الحاملة للتيار عادة، ويطلق على هذا النوع من التأريض تأريض الأجهزة.

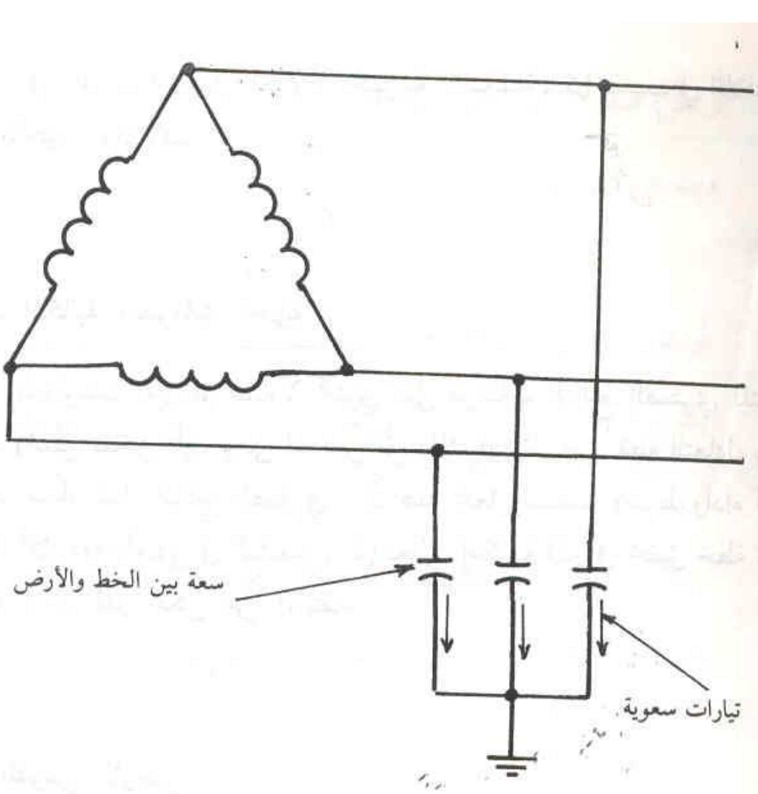
يطلق الأروبيون لفظ earthing على عملية التأريض وذلك على أساس أنها عملة توصيل بالأرض. وعلى العكس من ذلك، فإن الخبرة والمواصفات الأمريكية تفرِّق تفريقاً واضحاً بين لفظ ground ولفظ earth. يعتبر الأمريكيون أن اللفظ الأدق في الاستعمال هو لفظ grounding، حيث أنه يشير إلى وجود جسم له جهد مرجع reference voltage تُقاس بالنسبة له جميع الجهود الأخرى. وهذا الجسم ليس بالضرورة هو الأرض. فعملية التأريض داخل السيارة مثلاً هي في الواقع عملية توصيل بجسم السيارة، وعملية التأريض في طائرة أو حتى في قمر صناعي هي توصيل بجسم الطائرة أو بجسم القمر الصناعي. وعلى ذلك فإن لفظ ground في جميع المواصفات والمراجع الأمريكية تعني الجسم

الذي يمر فيه التيارات عن طريق التوصيل الكهربي معه والذي يُعتبر جهده صفراً بالنسبة لباقي المنظومة. أما لفظ earth فَيُستعمل للدلالة على الأرض ذاتها.

١ ـ ٢ تأريض المنظومة System grounding

يُطلق إسم المنظومة غير المؤرضة Ungrounded system على المنظومة التي لا تحتوي على إتصال متعمد بالأرض عن طريق توصيل نقطة التعادل مثلاً بالأرض أو عن طريق استخدام طرق معينة للحصول على مسار أرضي. لا توجد منظومة كهربية معزولة عزلاً كاملاً عن الأرض. إن هذا يرجع إلى أن أي موصل له سعة capacitance بالنسبة للأرض، وعلى ذلك فعندما يرتفع جهد هذا الموصل عن جهد الأرض تمر تيارات سعوية بين الموصل والأرض. يمكن تبعاً لما سبق اعتبار أن المنظومة غير المؤرضة هي في الواقع منظومة مؤرضة بواسطة مكثفات capacitive - grounded system. يبين الشكل ١ ـ ١. هذه الفكرة.

كانت معظم منظومات القوى الكهربية غير مؤرضة في الماضي، حيث كانت نقطة التعادل neutral تُترك معزولة. ومع الزيادة والتطور الذي حدث في تلك المنظومات: سواء من حيث كمية الأحمال أو عدد الأجهزة الموجودة في المنظومة، أصبح تشغيل المنظومة بنقطة التعادل المعزولة أمراً غير مقبول سواء من ناحية أمن الأفراد وسلامة الأجهزة أو من ناحية متطلبات التشغيل. ومع زيادة متطلبات الطاقة وأهمية استمرارية التشغيل أصبحت عملية تشغيل المنظومة المؤرضة هي الخبرة السائدة في جميع أنحاء العالم. إلا أنه يجب القول بأنه من الخبرة المعمول بها وجود أجزاء في المنظومة غير مؤرضة للوصول إلى أداء معين. ويمكن تلخيص العوامل التي تحدد اختيار التأريض من عدمه فيما يلي:



شكل ١ ـ ١ منظومة دلتا غير مؤرضة

أ ـ إستمرارية الخدمة:

أثبتت التجـربة الـطويلة أن المنظومـات المؤرضة أكـثر استمراريـة من تلك الغير مؤرضة، حيث تُزوّد المنظومة المؤرضة بأجهزة حماية أكثر حساسية ودقة يمكنها تحديد أي خطأ يحدث في المنظومة وفصله عنها بانتقاء كامل selectivity.

ب ـ مخاطر ارتفاع الجهد:

ينشأ عن حدوث قصر أرضي بين أحد الأوجه والأرض ارتفاع في جهد الوجهين السليمين يصل إلى ١٧٣٪ إذا كانت المنظومة غيرمؤرضة، بينما لا تحدث تلك الظاهرة في حالة تأريض نقطة التعادل. إن هذا الإرتفاع في جهد الوجه

يتسبب في حدوث انهيار في العوازل الكهربية المستعملة، كما يتسبب في اتلاف كثير من الأجهزه والآلات.

جـ - امكانية منظومات الحماية:

المنظومات غير المؤرضة لا تحتوي على مركبات التتابع الصفري للتيار أو الجهد (انظر الملحق أ)، وعلى العكس من ذلك فإن تأريض نقطة التعادل يسمح بوجود مسار لتيار التتابع الصفري. إن هذا يجعل تصميم وضبط وأداء أجهزة الحماية أكثر دقة وأسهل في التشغيل، كما يعطي إمكانية أكبر في تحقيق خطة تنسيق الحماية بأكبر قدر ممكن من الانتقاء.

د - القوس الأرضي:

تحدث ظاهرة القوس الأرضي عند حدوث قصر بين الوجه والأرض، حيث يتولد قوس كهربي بينهما عند نقطة اتصالها مما يسبب خطراً على الأفراد والمنشآت. ولا تحدث هذه الظاهرة في المنظومات المؤرضة.

هـ - امكانية التأريض الوقائي:

تسهِّل عملية تأريض المنظومة عمليات التأريض الوقائي وتأريض الأجهزة، حيث يتكون مسار سهل بين الكترودَي منظومة التأريض الوقائي ومنظومة القوى أثناء حدوث قصر أرضي يساعد في خفض قيمة جهد اللمس.

يتضح مما سبق أن تأريض المنظومة أصبح أمراً ضرورياً في عمليات تصميم وأداء وحماية منظومات القوى الكهربية. يمكن عمل التأريض بين نقطة التعادل والأرض بإحدى الطرق الآتية.

أ ـ تأريض مباشر: **Solid grounding**

ويتم فيه التوصيل بين نقطة التعادل والأرض بموصل دون وجود أي معاوقة بينهما.

ب ـ تأريض بمقاومه: **Resistance grounding**

ويكون فيه التوصيل بين نقطة التعادل والأرض من خلال معاوقة معظمها عبارة عن مقاومة (R >> X).

جـ ـ تأريض بمفاعلة: **Reactance grounding**

ويكون فيه التوصيل بين نقطة التعادل والأرض من خلال معاوقة معظمها عبارة عن مفاعلة (X >> R).

د ـ تأريض عن طريق كابح للقوس: **Arc - suppression coil**

وهو عبارة عن مفاعل reactor يوضع بين نقطة التعادل والأرض ويمكن تنغيمه على رنين مع سعة المنظومة عند حدوث القصر الأرضي. يمكن بذلك كبح القوس الكهربي الناتج من القصر.

هـ ـ التأريض باستخدام محولات تأريض:

يُستخدم محول زجزاج للحصول على نقطة تعادل للمنظومة في حالة عدم وجود مثل هذه النقطة كما في حالة توصيلة الدلتا مثلاً. يُسمى هذا المحول بمحول التأريض حيث يتم بعد ذلك توصيل نقطة تعادله بالأرض. يمكن كذلك استخدام محول نجمة/دلتا في عملية الحصول على نقطة التعادل.

يبين الجدول ١ ـ ١ مقارنة سريعة بين طرق التأريض المختلفة لنقطة التعادل.

جدول ١ ـ ١ مقارنة بين أنواع التأريض المختلفة لنقطة التعادل

الخاصية طريقة التأريض	تيار خطأ وجه - أرض ٪ من تيار القصر المتماثل	الجهود العابرة	فصل منطقة الخطأ	كامح التموّر	التوصية
غير مؤرض	أقل من ١٪	عالية جداً	غير ممكن	نوع غير مؤرض	نوع لا يوصى به لخطورته وصعوبة الحماية
تأريض مباشر	يتغير ـ قد يصل إلى أكثر من ٢٠٠ ٪	غير كبيرة	ممكن	نوع مؤرض من نقطة تعادله	يستخدم لجهود أقل من ٥٠٠ ڤولت وأكبر من ١٥ك.ف
تأريض بمقاومة صغيرة	في حدود ٢٠٪	غير كبيرة	ممكن	نوع غير مؤرض	في المنظومات الصناعية بين ٢,٥ - ١٥ ك.ف
تأريض بمقاومة عالية	أقل من ١٪ ولكن أكبر من تيار الشحن السعوي	غير كبيرة	غير ممكن	نوع غير مؤرض	يستعمل في حالات خاصة للأداء
تأريض بكابح للقوس	صفر تقريباً	غير كبيرة	غير ممكن	نوع غير مؤرض	مناسب في خطوط نقل الجهد العالي
تأريض بمفاعلة صغيرة	من ٢٥٪ إلى ١٠٠٪	غير كبيرة	ممكن	نوع مؤرض إذا كان التيار أكبر من ٦٠٪	يستخدم لجهود أقل من ٦٠٠ ڤولت وأكبر من ١٥ك.ف
تأريض بمفاعلة كبيرة	من ٥٪ إلى ١٠٪	عالية جداً	ممكن	نوع غير مؤرض	لا يستعمل لخطورة الجهود العابرة

١ ـ ٣ التأريض الوقائي Protective grounding

يُقصد بالتأريض الوقائي جميع أنواع التأريض المراد بها سلامة الأفراد أساساً. يمكن ـ تبعاً لهذا التعريف ـ أن نقول أن التأريض الوقائي يندرج تحته ما يأتي:

أ ـ تأريض الأجهزة equipment grounding.

ب ـ التأريض اللازم للحماية من الصواعق البرقية lightning protection grounding

حـ ـ التأريض اللازم للحماية من الشحنات الكهربية electrostatic protection grounding.

١ ـ ٣ ـ ١ تأريض الأجهزة

لكي نفهم فكرة تأريض الأجهزة نتصور جهازاً منزلياً بسيطاً عبارة عن سخان مياه يتكون من سلك حراري يمر به تيار يتغذى من مصدر للجهد أحادي الطور، والسلك معزول عن خزان السخان المعدني الخارجي. في حال التشغيل الطبيعي بدون أي أخطاء يصبح جهد الخزان الخارجي مساوياً للصفر، بحيث أنه إذا لامسه شخص واقف على الأرض (جهد الأرض = صفر) فلا يوجد فرق جهد بين أطراف هذا الشخص ولا يشعر بأي شيء.

نفرض الآن حدوث انهيار أو تلف في مادة العزل أدت إلى حدوث توصيل كهربي بين سلك التسخين وخزان المياه الخارجي. ينتج تبعاً لذلك أن يرتفع جهد الخزان إلى جهد يساوي جهد السلك. إذا لامس الشخص الواقف على أرض جهدها الصفر هذا الخزان فإنه يتعرض لفرق في الجهد مقداره V يكون سبباً في حدوث صدمة كهربية ضارة لهذا الشخص.

لو تصورنا بعد ذلك أننا وصلنا جسم الخزان المعدني بالأرض فمعنى هذا أنه عند حدوث القصر السابق فلا بد أن يمر التيار من جسم السخان إلى

الأرض من خلال موصل التأريض. وللحالة المثالية التي تكون عندها المقاومة بين جسم الخزان والأرض مساوية للصفر فإن فرق الجهد بينهما يكون مساوياً للصفر أيضاً ولا يتعرض الشخص الذي يلامس الخزان حينئذٍ لأي خطر. إلا أننا نجد أن هذه المقاومة لا تساوي الصفر في الحالة الواقعية، ونلاحظ طبعاً أنه كلما زادت المقاومة كلما كان خطر الصدمة الكهربية أكبر.

نفهم من ذلك أن تأريض الأجزاء المعدنية غير الحاملة للتيار أمر هام وحيوي لسلامة الأفراد أثناء حدوث قصر بينها وبين الموصلات الحاملة للتيار. كما رأينا أن المقاومة بين الجسم المؤرض والأرض لها تأثير على تلك السلامة، بحيث يجب الحصول على أقل مقاومة ممكنة تبعاً للظروف المتاحة والمواصفات المعمول بها.

١ ـ ٣ ـ ٢ تأريض الحماية من الصواعق

الصواعق البرقية هي عبارة عن شحنات كهربية تجمعت في السحب فأدت إلى زيادة شدة المجال الكهربي بين تلك السحب وبين الأرض (أو المنشآت التي فوق الأرض)، ومع زيادة تلك الشحنات تزيد شدة المجال الكهربي إلى أن تصل إلى قيمة يمكنها عندها أن تحدث انهياراً في العزل الكهربي للهواء وتنطلق الشحنة بين السحابة والأرض على شكل صاعقة برقية تحمل قدراً هائلاً من التيار الكهربي (الشحنات المتحركة)

٣ إننا لا يمكننا أن نمنع حدوث الصواعق ولكن يمكننا أن نتوقى ضررها عن طريق إيجاد وسيلة مناسبة لاستقبال تلك الصاعقة ثم توصيلها إلى الأرض بأمان في مسار محدَّد لها مسبقاً بحيث لا يسبب أية أضرار سواء للإنسان أو للمباني. هذا ما يُعرف باسم الحماية من الصواعق. وعلى ذلك فإن تجهيزات الحماية من الصواعق تتكون من ثلاثة أجزاء رئيسية.

أ ـ جزء استقبال الصاعقة من الهواء، وهو ما يُعرف باسم دائرة الاستقبال أو الحماية الهوائية والذي نطلق عليه اسم مانعة الصواعق.

ب ـ جزء التوصيل من مانعة الصواعق إلى الأرض، وهو عبارة عن أجسام معدنية موصلة للتيار تتصل كهربياً بدائرة الحماية الهوائية ثم تهبط حتى الأرض لتسليم الصاعقة إلى الدائرة الأرضية. يعرف هذا الجزء بأسم الموصلات الهابطة.

جـ ـ دائرة الحماية الأرضية، وهي عبارة عن موصلات مدفونه في باطن الأرض. يكون هذا الجزء مسئولاً عن استقبال تيار الصاعقة من الموصلات الهابطة وتوصيلها إلى باطن الأرض لكي تتحول بعد ذلك إلى تيارات شاردة ومشتته في الأرض.

تجدر الإشارة هنا إلى أنه لا يمكن من وجهة النظر العملية الحصول على حماية كاملة من الصواعق البرقية. إن هذا يرجع إلى الطبيعة العشوائية للصواعق، حيث أنها من الممكن أن تصطدم بالأرض أو بالأشخاص الواقفين على الأرض أو بأي جسم أو مبنى موجود على سطح الأرض أو حتى في باطن الأرض من أي اتجاه. ولقد سببت الصواعق البرقية كثيراً من الحوادث التي وصلت أحياناً إلى حد الكارثة. فلقد حدث ـ على سبيل المثال ـ أن اصطدمت صاعقة برقية بأحد خزانات الوقود في المانيا رغم عمل الحماية المطلوبة لهذا الخزان. أدى ذلك بالطبع إلى انفجار الخزان. كما قتلت صاعقة إثنين من لاعبي كرة القدم أثناء المبارة في انجلترا عام ١٩٤٨. وكثيراً ما تعرض الأشخاص لخطر الموت بسبب مثل تلك الصواعق، ولقد سُجِّلت في مصر عدة حالات وفاة في العشرين سنة الماضية بسبب التعرض للصواعق. ولا شك أن كثيراً من تلك الحوادث المشابهة قد حدثت وتحدث في الوطن العربي دون الإهتمام بها أو تسجيلها.

تسبب الصواعق البرقية خطراً شديداً على خطوط القوى الكهربية الهوائية وكذلك على محطات القوى الكهربية ومحطات المحولات. ويمثل موضوع الحماية من مثل تلك الصواعق مجالاً هاماً من مجالات هندسة القوى الكهربية وهندسة الجهد العالي.

إن هندسة الحماية من الصواعق البرقية هي خبرة هندسية إلى حدٍ كبير. وسوف نلاحظ ذلك من خلال دراستنا لهذا الموضوع، حيث نجد إختلافات

واضحة في خطط الحماية بين الخبرات العالمية الرئيسية المعمول بها على مستوى العالم.

١ - ٣ - ٣ تأريض الحماية من الشحنات الكهروستاتيكية

تتكون الشحنات الكهروستاتيكية في بعض الصناعات بسبب الحركة النسبية بين سطحين متلامسين لجسمين من مادتين مختلفتين عادة. كما تتولد تلك الشحنات عند وجود أجهزه أو آلات تولد بطبيعتها شحنات كهربية. إن خطر وجود تلك الشحنات يتمثل فيما يأتي:

أ - حدوث شرر كهربي نتيجة لتفريغ الشحنة من جسم إلى آخر ممّا قد يؤدي إلى حوادث وحرائق وانفجارات خاصة في الصناعات الخطرة.

ب - حدوث صدمة كهربية للأشخاص مما يعرضهم للخطر.

جـ - تلف بعض الأجهزة الالكترونية الحساسة بسبب تراكم تلك الشحنات عليها.

د - تشويش على شاشات أجهزة الكمبيوتر وتداخل في المعلومات بسبب المجالات الكهربية والمجالات الكهرومغناطيسية الناشئة بسبب تولد تلك الشحنات أو بسبب التفريغ الكهربي.

يقصد بالحماية الكهروستاتيكية إيجاد وسيلة لمنع تولد تلك الشحنات - إذا أمكن ذلك - أو للتخلص منها أولاً بأول وذلك بتوصيلها إلى الأرض بمجرد تولدها.

إن أهم الصناعات التي يجب فيها مراعاة الحماية الكهروستاتيكية هي:

أ - جميع الصناعات التي تحتوي على سيور belts إدارة مصنوعة من مواد غير موصلة.

ب - المناجم.

جـ - صناعات تجهيز الحبوب باختلاف أنواعها.

د - صناعات تعبئة الغازات والسوائل خصوصاً القابلة للإشتعال.

هـ - صناعات الطلاء.
و - صناعات الورق والطباعة.
ز - صناعات المطاط.
ح - الغزل والنسيج.
ط - الصناعات الالكترونية.
ي - المستشفيات.

تختلف طرق الحماية الكهروستاتيكية باختلاف الظروف في كل صناعة وباختلاف نوعية تلك الحماية (هل هي للأفراد أم للأجهزة).

سوف نقدم في الباب الخامس أهم الأفكار المستخدمة في هذا المجال.

الباب الثاني

تأريض الأجهزة
EQUIPMENT GROUNDING

٢ ـ ١ مقدمة

ذكرنا في الباب الأول أن التأريض ينقسم إلى نوعين رئيسيين هما تأريض المنظومة والتأريض الوقائي الذي يتضمن تـأريض الأجهزة. إن الغـرض من تأريض المنظومة هو تأريض نقطة التعادل بالطريقة التي تحقق الأداء المطلوب من تلك المنظومة وخصوصاً أثناء فترات الخطأ وقصر الدائرة. وعلى خلاف ذلك، فإن عمليـة تأريض الأجهـزة هي عملية تـأريض المواد المـوصلة غير الكهربية (الغير حامله للتيار وجهدها مساوٍ للصفـر) monelectrical conductive materials. هذه المواد الموصلة (وهي مواد معدنية في معظم الأحيان) إما أن تكـون مغلّفةً لـموصلات مجهـدة energized كما في حـالـة الغـلاف المعـدني للكـابـل cable sheath أو التسليـح المعدني لـه armour، وإما أن تكـون تلك المـواد الموصلة محيطة بالموصلات المجهدة أو قريبة منها كما في حالة جميع الهياكل المعدنية المحيـطة بجميع الآلات الكهـربية وكـذلك حـالة المجـاري ducts المعدنية التي توضع فيها الكابلات، بالإضافة إلى الأرفف والهياكل والممرات المعدنية التي توضع عليها الآلات الكهربيـة أو تلك التي تُستعمل كمَمَـرَّات حاملة للكابلات الممددة في الهواء.

إن الأهداف الرئيسية من عملية تأريض الأجهزة هي ما يأتي:

أ ـ التأكد من عدم احتمال حدوث أخطار على الأفراد المجاورين للأجهزة

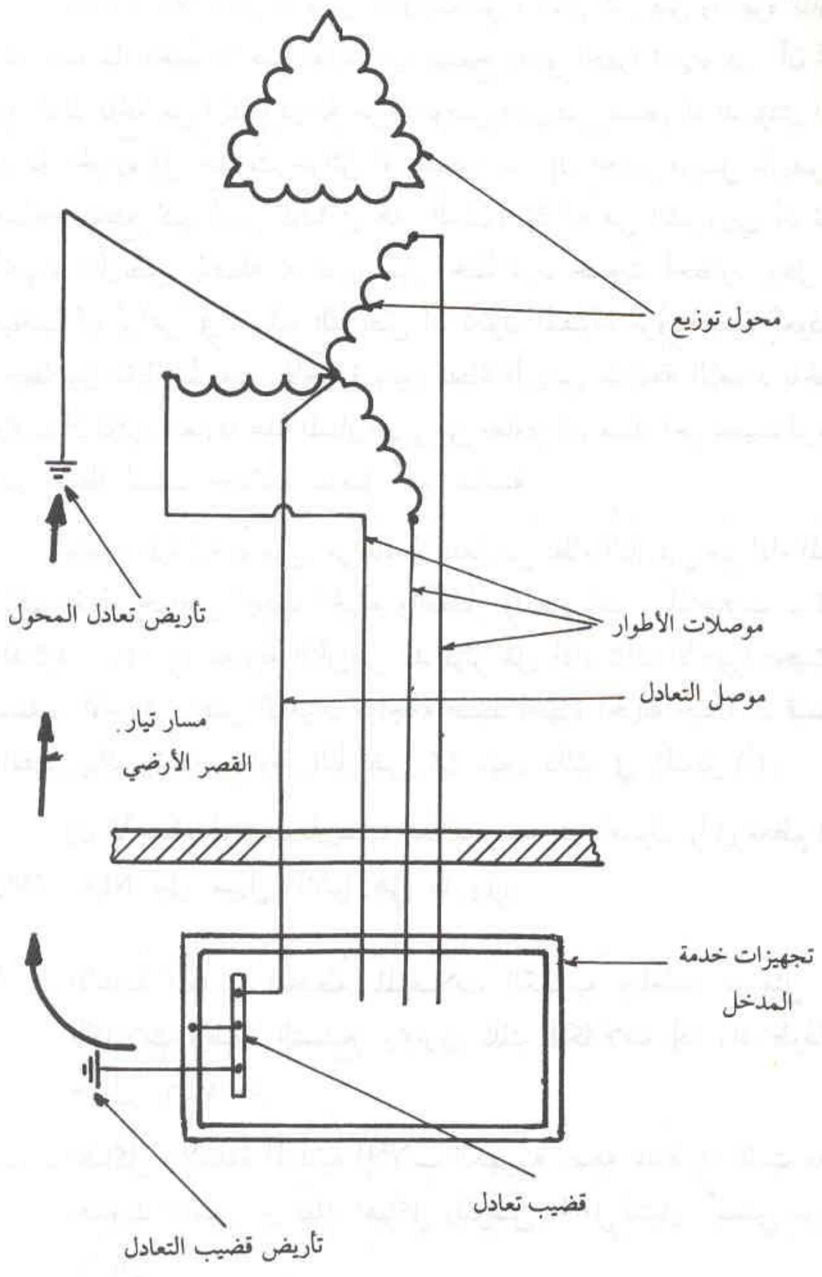
والمعدات الكهربية نتيجة لصدمات الجهد الكهربية . electric - shock - voltage

ب - إيجاد وسيلة لها القدرة على حمل تيار الخطأ سواء بالنسبة لمقدار هذا التيار أو فترة استمراره، دون التسبب في حدوث أية حوادث مثل الحرائق أو الإنفجارات. هذا التيار هو عبارة عن تيار الخطأ الأرضي المسموح بمروره والذي باستطاعة أجهزة الحماية أن تفصله بأمان بعد الفترة الزمنية المحّددة بواسطة عمليات حساب تنسيق أجهزة الحماية والقطع.

جـ - أن تساهم عملية تأريض الأجهزة في تحسين أداء المنظومة الكهربية كوحدة متصلة عن طريق إيجاد مسارات لتيارات الخطأ الأرضي ذات معاوقة منخفضة.

تحدث صدمة الجهد الكهربي التي نتحدث عنها في هذا الباب عند ملامسة الإنسان للأجزاء المعدنية التي كان من المفروض أن تكون غير مجهدة وإنما اكتسبت جهداً نتيجة لاتصالها بموصل مجهد حامل للتيار. عند حدوث هذا الإتصال الكهربي يرتفع جهد الجزء المعدني إلى جهد الموصل الحامل للتيار. يتضح من ذلك أنه لتجنب حدوث مثل تلك الظاهرة، وبالتالي تجنب حدوث مخاطر صدمات الجهد فإن تلك الأجزاء المعدنية يجب توصيلها بالأرض بحيث تؤدي عملية التوصيل بالأرض إلى وجود مسار للتيار بين الجزء المعدني والأرض، ثم يمتد هذا المسار بعد ذلك بحيث يكون متصلاً كهربياً مع الكترود تأريض المنظومة المغذية للحمل والذي من المفروض أن يكون جهده مساوياً للصفر. يوضح الشكل ٢ - ١ هذه الفكرة.

عند مرور تيار قصر خط - أرض من الجسم المؤرض إلى الأرض من خلال موصل تأريض والكترود تأريض بمعاوقة Z فإن جهد الجسم المؤرض يصبح (IZ) وعندحد معين فإن ذلك يشكل خطراً على من يلامس الجسم أثناء القصر. يتضح من ذلك مدى ارتباط عملية التأريض بمقدار تيار الخطأ وكذلك معاوقة مسار التأريض بين الجهاز المؤرّض والأرض. يعطي الملحق (أ) الطرق التفصيلية لحسابات تيارت القصر في جميع الحالات المختلفة المحتمل حدوثها.


محول توزيع
تأريض تعادل المحول
موصلات الأطوار
موصل التعادل
مسار تيار القصر الأرضي
تجهيزات خدمة المدخل
قضيب تعادل
تأريض قضيب التعادل

شكل ٢ - ١ النظام العام للتأريض

يجب ـ علاوة على ما سبق ـ أن يتحمل موصل التأريض وأجهزة التأريض المصاحبة تيار الخطأ الأرضي لفترة زمنية تسمح بعمل أجهزة الحماية دون أن تحدث أية مخاطر ناتجة عن ارتفاع درجة حرارة موصل التأريض نفسه، إذ قد يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى حدوث حرائق أو انفجارات. إن اختيار موصل تأريض ذي مساحة مقطع كبير ليس كافياً في هذا الشأن؛ إذ أنه من الضروري أن تسمح أجهزة التأريض المتصلة به بمرور تيار الخطأ دون حدوث أخطار. وعلى ذلك فيجب أن يُراعَي في عملية التأريض أن تكون المنظومة مزوَّدة بمسار لعودة تيار الخطأ بين نقطة تأريض الأجهزة وبين نقطة تأريض منظومة الإمداد بالخدمة، ويجب أن تكون معاوقة هذا المسار أصغر من معاوقة أي مسار آخر بحيث لو مرَّ فيه تيار الخطأ لسبب حالات تشغيل غير مناسبة.

وتجدر الإشارة بوجوب مراعاة ألا يتعارض نظام التأريض مع أداء المنظومة الكهربية أو خواص أجهزة الحماية والفصل (المصهرات ـ المرحلات ـ قواطع الدائرة. . .). إن معاوقة التأريض قد تؤثر على أداء تلك الأجهزة بحيث ربما يتطلب الأمر في بعض الأحيان مراجعة ضبط أجهزة الحماية حيث أن قيمة تيار القصر يتأثر بقيمة معاوقة التأريض كما يتبين ذلك في الملحق (أ).

إن الأجسام الواجب تأريضها تبعاً للمواصفات المعمول بها في معظم الدول (NEC - 250 على سبيل المثال) هي ما يأتي:

أ ـ الأغلفة المعدنية المحيطة بالموصلات الكهربية والمغلِّفة لها مثل أغلفة الكابلات وطبقة التسليح ومجاري تلك الكابلات إذا زاد طولها عن حوالي ٧,٦ متر.

ب ـ الهياكل والأغلفة المعدنية للآلات الكهربية بصفة عامة إذا كانت معرضة لحدوث تلامس بين تلك الهياكل والموصل الحامل للتيار. يُستثني من ذلك ما يأتي.

i - المفاتيح وقواطع الدائرة المستعملة في غير أغراض مدخل الخدمة بشرط استعمالها بواسطة متخصصين فقط.

ii - المحولات والمكثفات الموضوعة على أعمدة خشبية بشرط أن تكون على ارتفاع لا يقل عن ٢,٤ متر.

iii - الأجهزة المزودة بطريقة عزل مزدوج يمنع إحتمال إتصال الغلاف الخاجي مع الموصلات الحاملة للتيار. ويجب في تلك الحال أن يُشار إلى هذه الأجهزة من قِبَل المصنع.

جـ - أغلفة وهياكل المحركات وأجهزة التحكم وأجهزة المصاعد والأوناش.

د - الأجهزة الموجودة في الجراجات والمسارح ودور العرض والاستوديوهات.

هـ - أجهزة الإشارات الكهربية والعرض.

و - المحركات والمولدات المتصلة بشبكات أنابيب المياه والمضخات.

ز - لوحات التوزيع وحوامل المفاتيح.

ح - بعض الأجهزة غير الكهربية مثل الحبال المستعملة لسحب المصاعد وهياكل ومسارات الأوناش التي تُدار بالكهربا.

ط - المقابس والكوردونات المتصلة بالأجهزة الصناعية، إلا إذا كانت بعيدة عن متناول الأفراد.

ي - المقابس والكوردونات المتصلة بالأجهزة المنزلية التي تعمل بمحركات، وكذلك الأباجورات والعدد اليدوية الكهربية.

تتكون منظومة التأريض الوقائي بصفة عامة من المكونات الآتية:

١ - الأرض، وهي التربة التي يوضع فيها الكترودات التأريض.

٢ - الكترودات التأريض، وتوضع عادة في باطن الأرض.

٣ - موصلات التأريض، وهي المسارات التي تصل كهربياً بين الجسم المؤرض والكترودات التأريض، أو بين أي نقطتين في منظومة التأريض.

٤ - تجهيزات الربط bonding والوصل connection وبعض التجهيزات الأخرى.

سوف نتناول هذه المكونات بالدراسة التفصيلية وكذلك الأمور المتعلقة بها في البنود الآتية من هذا الباب.

٢ - ٢ الأرض Earth

إن المقاومة التي تظهر بعد عملية وضع الالكترود داخل التربة تتألف من ثلاثة عوامل هي:

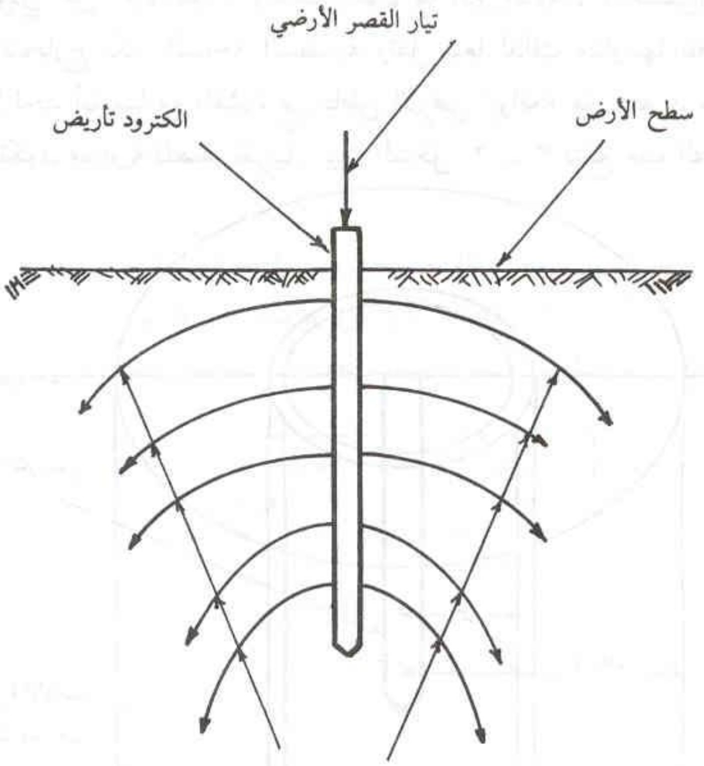
i - مقاومة الالكترود المعدني.

ii - مقاومة التلامس بين الالكترود والأرض.

iii - مقاومة تربة الأرض، وهي المقاومة التي تُظهرها تلك التربة لسريان التيار خلالها ابتداء من السطح الخارجي لالكترود التأريض متجهة إلى الخارج تبعاً لمسارات التيار الأرضي وحتى اللا نهاية من وجهة النظر النظرية.

يمثل العاملان الأول والثاني نسبة ضئيلة جداً من مقاومة التأريض grounding resistance بحيث يمكن إهمال تأثيرهما دائماً، ويبقى عامل مقاومة التربة وهو العامل المؤثر في تحديد قيمة مقاومة التأريض.

لعل من المفيد لنا قبل البدء في دراستنا للتصميمات الخاصة بمنظومة التأريض أن نفهم طبيعة مقاومة التربة earth resistance وكيفية مقاومتها للتيار والعوامل المختلفة التي تؤثر عليها. عند دفن الكترود التأريض في باطن الأرض فإن المنطقة من الأرض المحيطة بهذا الالكترود تعرف باسم منطقة المقاومة أو منطقة انحدار الجهد potential gradient area. يحاول تيار الخطأ الأرضي التدفق خارج سطح الالكترود في جميع الإتجاهات من النقطة ذات الجهد الأعلى إلى تلك النقط ذات الجهد الأقل. أي أن إتجاه مرور التيار هو المسؤول عن ارتفاع جهد الكترود التأريض، كما أن تدفق التيار داخل الأرض يعتمد أساساً على مقاومية التربة المدفون بها الالكترود. يبين الشكل ٢ - ٢ توضيحاً لهذا الشرح.

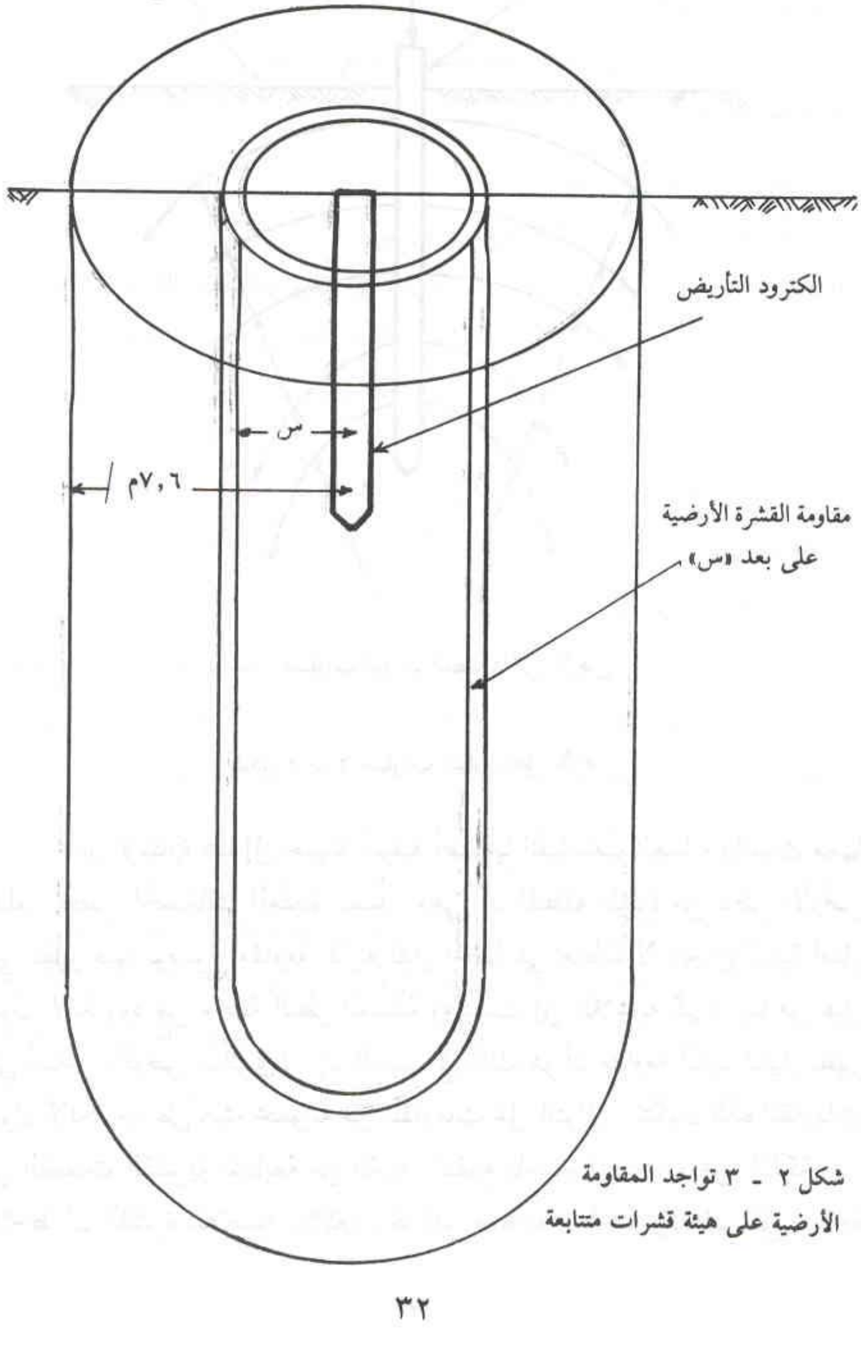


مسارات تيارات القصر داخل الأرض

شكل ٢ ـ ٢ مسارات التيار داخل الأرض

تجدر الإشارة هنا إلى حقيقة عملية أظهرتها القياسات العملية واتفقت معها كذلك بعض الحسابات المعقدة نسبياً، وهي أن المنطقة المؤثرة من باطن الأرض التي تظهر فيها بوضوح مقاومة التربة لتيار الخطأ هي منطقة لا تتجاوز ثمانية أمتار حول الالكترود من وجهة النظر العملية (وليست إلى اللانهاية كما ذكرنا من قبل على أساس الفرض النظري). إن السبب في ذلك هو أن مقاومة التربة للتيار تظهر حول الالكترود على هيئة مجموعة من المقاومات على التوالي. تتكون هذه المقاومات من الطبقات القشرية المتتابعة من التربة، تتقدم باستمرار خارجة عن الالكترود. نلاحظ أن القشرة الملاصقة للاكترود لها أقل مساحة سطحية وكذلك أقل مساحة

مقطع عمودي على اتجاه التيار، وبذلك يكون لها أكبر مقاومة. وباستمرار تتابع القشرات للخارج تكبر المساحة السطحية وتقل تبعاً لذلك مقاومتها باضطراد بحيث أننا نجد أن مقاومة القشرة من باطن الأرض الواقعة على بعد ٨ متر من الالكترود تكون مساوية للصفر تقريباً. يبين الشكل ٢ - ٣ تتابع هذه القشرات


الكترود التأريض
س
٧,٦م
مقاومة القشرة الأرضية
على بعد «س»

شكل ٢ - ٣ تواجد المقاومة
الأرضية على هيئة قشرات متتابعة

بالنسبة لالكترود تأريض قياسي على شكل قضيب طوله ٣ متر وقطره ١٦ مم مدفون في الأرض، كما يبين الجدول ٢ ـ ١ تغير المقاومة الأرضية لهذا القضيب ابتداء من سطحه الخارجي كنسبة مئوية على أساس أن المقاومة على بعد ٧,٦ متر تمثل ١٠٠٪ من المقاومة الكلية للأرض.

جدول ٢ ـ ١ مقاومة الكترود طوله٣م وقطره ١٦مم بدلالة بعده س عن سطح الالكترود
(المقاومة الكلية على بعد ٧,٦م = ١٠٠٪)

المسافة س متر	النسبة المئوية التقريبية
,٠٣	٢٥
,٠٦	٣٨
,٠٩	٤٦
,١٥	٥٢
١	٦٨
١,٥	٨٦
٣,٠	٩٤
٤,٦	٩٧
٦,١	٩٩
٧,٦	١٠٠
...	...
٣٠,٥	١٠٤
٣٠٥	١١٧

من الأمور الواجب اتباعها والتي نوصي دائماً بالإهتمام بها دراسة مقاومية التربة earth resistivity في مكان التأريض. ويجب ملاحظة أن مقاومية التربة تتغير بتغير العمق من سطح الأرض كما أنها تعتمد على كمية ونوع الأملاح الموجودة في التربة ودرجة تركيزها، هذا بالإضافة إلى محتوى الرطوبة ودرجة

الحرارة. من المفيد هنا أن نذكر أن وجود المياه السطحية أو التربة الرطبة أو المبللة ليس بالقطع دليلاً على انخفاض مقاومية التربة. إن الماء بخاصيته غير موصل للتيار الكهربي، كما أن التربه الجافة تماماً هي الأخرى غير موصله للكهربا بصرف النظر عما تحتويه من أملاح. مُجْمل القول في ذلك أن مقاومية التربة هي تلك المقاومية الخاصة بالمحلول الالكتروليتي electrolyte الموجود في التربة والمتكون من الأملاح والماء معاً. يبين الجدول ٢ ـ ٢ مقاومية التربة تبعاً للمكونات المختلفة لها، بينما يعطي الجدول ٢ ـ ٣ تأثير محتوي نسبة الرطوبة على مقاومية نوع من هذه المكونات، ويعطي الجدول ٢ ـ ٤ تأثير درجة الحرارة على مقاومية تربة مكونة من طفلة رملية بمحتوى رطوبة ١٥,٢٪.

نود أن نلفت الإنتباه في هذا المجال إلى أن محتوى الماء داخل التربة يتغير بتغير فصول السنة، ويجب تبعاً لذلك إجراء الدراسات الخاصة بمقاومية التربة في أكثر فصول السنة جفافاً حتى يمكن إجراء التصميمات والحسابات تحت فرض أسوأ الظروف التي من المحتمل أن تتعرض لها منظومة التأريض.

٢ ـ ٢ ـ ١ قياس مقاومية التربة

إن الدراسة المطلوب إجراؤها على مقاومية التربة يجب أن تتم على أعماق مختلفة من سطح الأرض نظراً لتغير تلك المقاومية مع العمق عن سطح الأرض كما ذكرنا من قبل. يمكن إجراء تلك الدراسة بطريقة بسيطة تُعرف بطريقة ڤينر Winner. تحتاج هذه الطريقة إلى الأجهزة الآتية:

أ ـ مقياس اتزان صفري null balance meter أو جهاز اختبار IR الذي يُعرف باسم IR tester مزود بأربعة أطراف وبداخله مولد.

ب ـ أربعة قضبان صلب طول الواحد ٦٠٠ مم وقطره ١٣ مم. هذه القضبان الأربعة تمثل الكترودات الإختبار.

جـ ـ أربعة كابلات معزولة توصل بالكترودات الإختبار. يجب أن تكون هذه الكابلات ذات مرونة كافية حتى تتحمل الظروف القاسية التي تُجري فيها التجربة عادة. يعتمد طول هذه الكابلات على المسافة التي يجب أن يدفن

جدول ٢ ـ ٢ مقاومية التربة ومقاومة قضيب التأرض

نوع التربـــــة	المقاوميـــــة (أوم سم)			مقاومة قضيب طوله ٣ متر وقطره ١٦مم (أوم)		
	المتوسط	أقل قيمة	أكبر قيمة	المتوسط	أقل قيمة	أكبر قيمة
رماد . أتربة ـ مستنقعات مالحة ـ مخلفات ملحية .	٢٣٧٠	٥٩٠	٧٠٠٠	٨	٢	٢٣
صلصال ـ طفله ـ طين .	٤٠٦٠	٣٤٠	١٦٣٠٠	١٣	١,١	٥٤
طفله ـ أو طين مع إضافة رمل وحصى .	١٥٨٠٠	١٠٢٠٠	١٣٥٠٠٠	٥٢	٤	٤٤٧
رمل ـ حجارة مع طفله قليلة أو صلصال .	٩٤٠٠٠	٥٩٠٠٠	٤٥٨٠٠٠	٣١١	١٩٥	١٥١٦

جدول ٢ ـ ٣ تأثير محتوى الرطوبة على مقاومية التربة (طفله رملية)

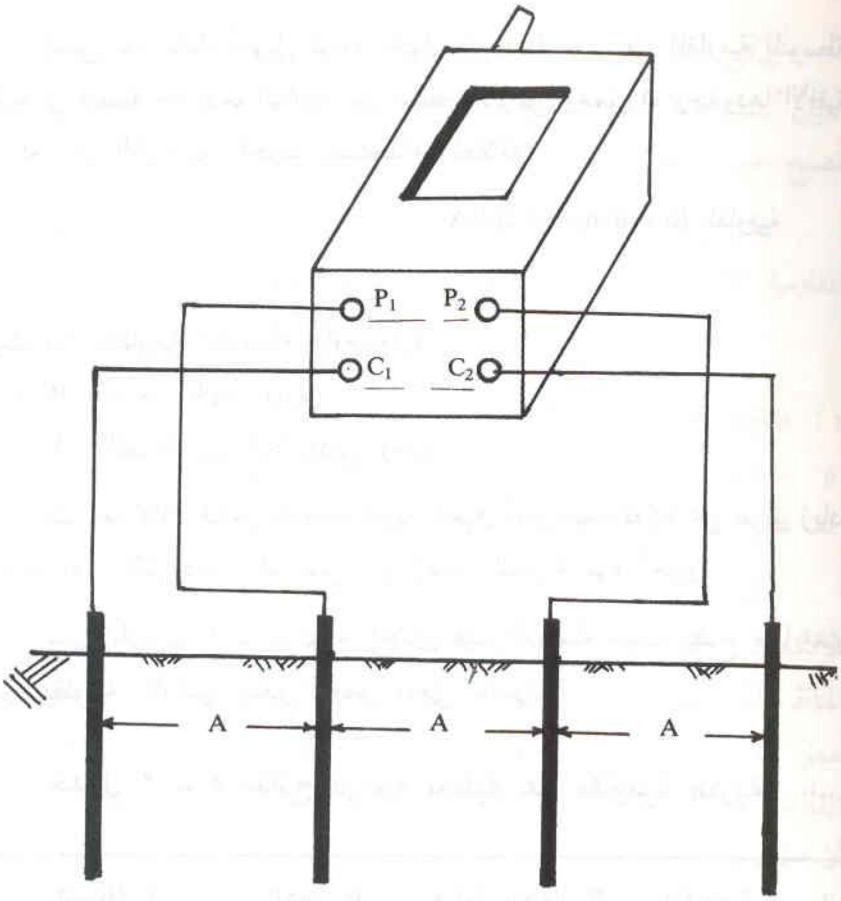
محتوى الرطوبة ٪ بالوزن	المقاوميـــــة (أوم.سم)
صفر	١٠٠ × $١٠^{٦}$ وأكبر
٢,٥	١٥٠٠٠٠
٥	٤٣٠٠٠
١٠	١٨٥٠٠
١٥	١٠٥٠٠
٢٠	٦٣٠٠
٣٠	٤٢٠٠

جدول ٢ ـ ٤ تأثير درجة الحرارة على مقاومية التربة (طفله رملية)

درجة الحرارة (°م)	المقاومية (اوم.سم)
٢٠	٧٢٠٠
١٠	٩٩٠٠
صفر (ماء)	١٣٨٠٠٠
صفر (جليد)	٣٠٠٠٠
ـ ٥	٧٩٠٠٠
ـ ١٥	٣٣٠٠٠٠

إليها الالكترود في باطن الأرض من أجل الحصول على قراءات مُرْضِية. يمكن القول بصفة عامة أنه ليس من الوجهة الإقتصادية السليمة دفع الالكترود إلى أكثر من ٣٠ متراً داخل التربة. وعلى ذلك فإن كابلين بطول الواحد ٤٠ متر وكابلين بطول الواحد ٣٠ متر يصبحان مناسبين لإجراء القياسات في جميع الأحوال. وعلى أية حال فإذا كانت مقاومية التربة على عمق ٣٠ متر ما زالت كبيرة فمن الأفضل استعمال أكثر من الكترود تأريض.

تتم عملية القياس بدفع الالكترودات الأربعة في الأرض على خط مستقيم بحيث يكون مركز الالكترودات هو موضع النقطة التي يُقاس عندها مقاومية التربة. تؤخذ المسافات بين الالكترودات بحيث تكون متساوية كما هو موضح بالشكل ٢ ـ ٤. يكفي دفع الالكترودات داخل التربة إلى عمق ٣٠٠ مم. الالكترودان المتطرفان هما الكترودا التيار ويوصلان على طرفي التيار C_1 و C_2، والالكترودان المتوسطان هما الكترودا الجهد ويوصلان على طرفي الجهد P_1 و P_2 للجهاز.



شكل ٢ ـ ٤ استخدام مقياس المقاومة لقياس مقاومية التربة

يمر التيار المولد من الجهاز في الالكترودين المتطرفين كما يظهر فرق الجهد بين الالكترودين المتوسطين، ويتم قراءة العلاقة (الجهد ÷ التيار) مباشرة بالأوم على قراءة الجهاز (المقاومة R).

إن المقاومة R التي تم قياسها في التجربة هي المقاومة المتوسطة (أو الظاهرية) لجميع طبقات التربة إبتداء من السطح وحتى عمق يساوي D. يؤخذ هذا العمق بحيث يكون مساوياً لثلاثة أرباع المسافة A بين كل قضيبين. عندما تكون A مساوية لأربعة أمتار مثلاً فإن D تساوي ثلاثة أمتار، وعندما A = ١٢ متراً فإن D = ٩ أمتار، وهكذا.

يمكن بعد ذلك تحويل قراءة الجهاز إلى قيمة تعبر عن المقاومية المتوسطة للتربة في منطقة حدودها الرأسية بين سطح الأرض وعمق D وحدودها الأفقية المسافة بين الكترودي الجهد بإستخدام العلاقة:

المقاومية Resistivity $\rho = 2\pi RA$

حيث ρ: المقاومية المتوسطة (أوم . متر)
R: قراءة الجهاز (أوم)
A: المسافة بين الكترودين (متر)

يتم بعد ذلك قياس مقاومية التربة لأعماق أكبر للمسافة D عن طريق زيادة المسافة بين الكترودات التأريض ثم إعادة التجربة مرة أخرى.

يبين الجدول ٢ ـ ٥ نتائج إحدى هذه الدراسة حيث يتضح منها مدى تغير المقاومية الأرضية بتغير العمق المعنى بالدراسة.

جدول ٢ ـ ٥ نتائج دراسة نمطية على مقاومية التربة

المسافة A (متر)	العمق D (متر)	قراءة الجهاز R (أوم)	المقاومية ρ (أوم ـ متر)
٢	١,٥	٩٠	١١٤٠
٤	٣	٢١,٥	٥٣٨
٨	٦	١٠	٥٠٢
١٢	٩	٥,٥	٤١٥
٢٤	١٨	٣	٤٥٠
٤٠	٣٠	٢	٥٠٢

يمكن الاستفادة بطريقة جيدة من الدراسة السابقة على مقاومية التربة في تعيين أنسب عمق دفن يدفع إليه الالكترود بحيث أن زيادة عمق الدفن بعد ذلك تصبح غير مفيدة. يتم ذلك كما يأتي:

يمكن إيجاد مقاومة الألكترود بدلالة عمق المسافة D المحسوب عليها المقاومية الأرضية بإستخدام العلاقة: (راجع الملحق ب)

$$r = 0.366 \times \rho \times \log_{10} (3D/d)/D$$

r : مقاومة الالكترود بالأوم.

ρ: مقاومية الأرض المقاسة بالأوم. متر على عمق D متر.

d: قطر الألكترود بالمتر.

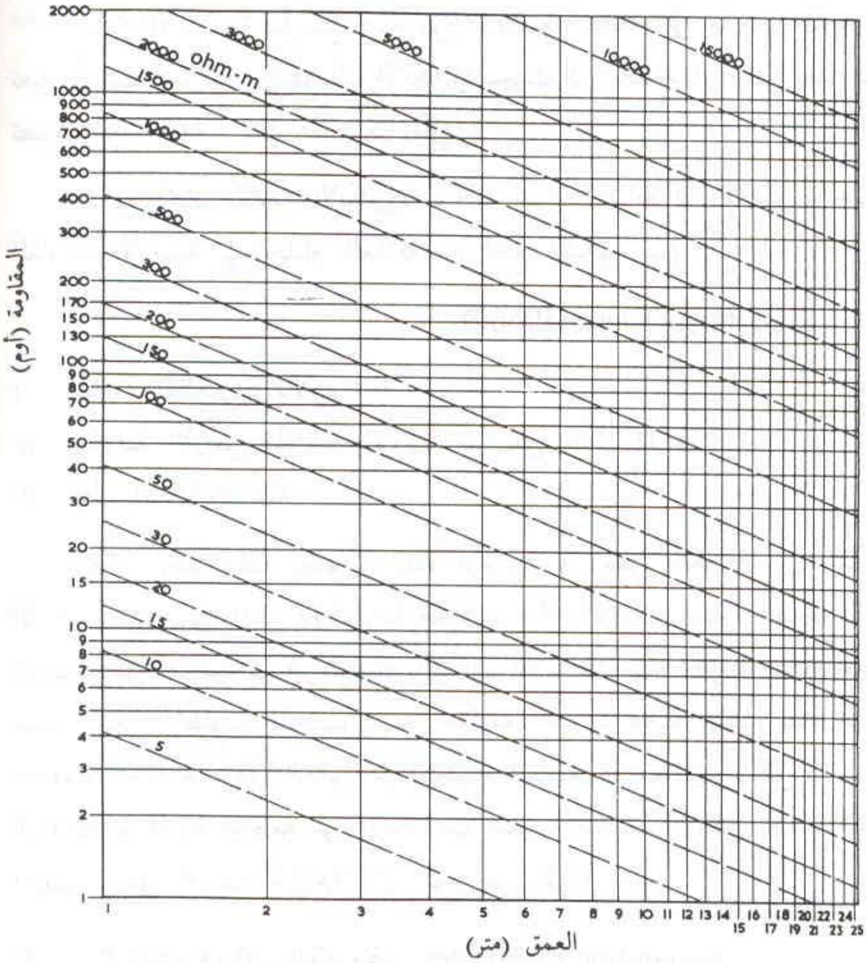
يمكن بعد ذلك رسم خريطة لوغاريتميه تعطي العلاقة بين مقاومة الالكترود r وعمق الدفن D لمقاومية معينة من التربة وذلك برسم الخطوط المائلة المناظرة لكل مقاومية كما هو موضح بالشكل ٢ ـ ٥. بهذه الخريطة يمكن تحديد عمق الدفن المطلوب للحصول على مقاومة الكترود معينة وذلك بعد تحديد المقاومية للتربة عند هذا العمق من التجربة السابقة. لاحظ في الشكل ٢ ـ ٥ أن الخطوط المائلة المقطعة هي لتربة ذات مقاومية منتظمة. ويكن بطبيعة الحال الحصول على خريطة مشابهة لأي نوع من أنواع التربة.

٢ ـ ٣ الكترودات التأريض Grounding Electrodes

يمكن بصفة عامة تقسيم الكترودات التأريض إلى مجموعتين أساسيتين.

أ ـ الالكترودات الموجودة بطبيعتها في إنشاءات المبنى existing electrodes، وهي عبارة عن الإنشاءات المعدنية الداخلة في تكوين المبنى والمتصلة إتصالاً جيداً ومستمراً بالأرض وتشمل ما يأتي:

- i - أنابيب المياه والغاز المعدنية.
- ii - الهياكل المعدنية للمبنى.
- iii - الأعمدة الحديدية.
- iv - الأعمدة الخرسانية التي تحتوي على حديد تسليح.



شكل ٢ ـ ٥ خريطة المقاومية الأرضية ومقاومة الالكترود

٧ - جميع المنشآت المعدنية الموجودة تحت الأرض والمبنية أساساً لغير أغراض التسليح. ويستثنى مما سبق منشآت الصرف الصحي المعدنية حيث لا يجوز استعمالها كالكترودات تأريض.

ب ـ الالكترودات التي تصنع وتركب بغرض التأريض أساساً، ويتم دفنها في باطن الأرض لهذا الغرض.

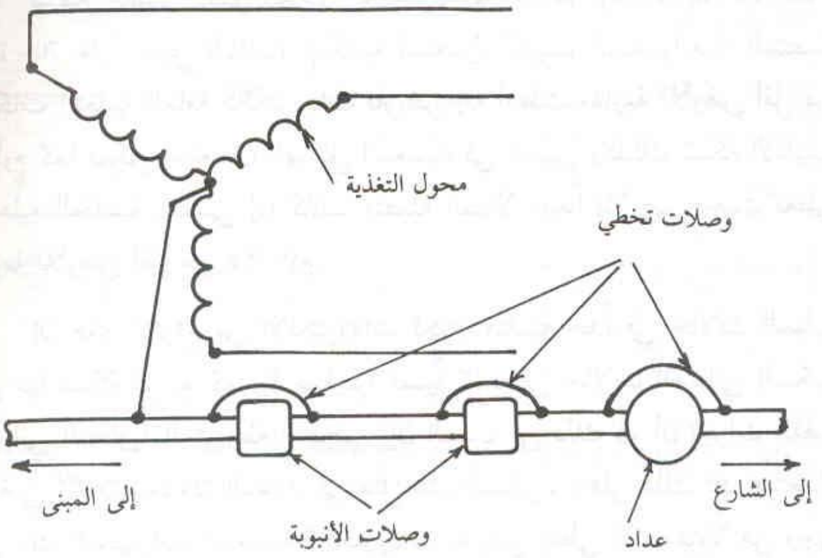
٢ ـ ٣ ـ ١ الالكترودات الموجودة في المبنى

تسمح معظم المواصفات المعمول بها عالمياً (NEC, ANSI/NFPA 70 - 1981 على سبيل المثال) بإمكانية استعمال أنابيب المياه والغاز المتصلة بشبكات التغذية العامة كالكترودات تأريض إذا أعطت مقاومة للأرض أقل من ٣ أوم كما يمكن استعمال الهياكل المعدنية في المبنى وكذلك شبكة الأنابيب المحلية الخاصة بالمبنى إذا كانت متصلة إتصالاً جيداً بالأرض بحيث تعطي مقاومة للأرض أقل من ٢٥ أوم.

إن هذه الأنواع من الالكترودات تكون مناسبة جداً في حالات المباني التي بها شبكة توزيع كهربية صغيرة نسبياً كما في حالات المباني السكنية والمباني التجارية المتوسطة الحجم. إن السبب في ذلك هو أن تيارات القصر الأرضي تكون محدودة المقدار في مثل هذه المباني، وعلى ذلك فإن استعمال مثل تلك التجهيزات المعدنية كالكترودات تأريض يعطي أداء مقبولاً من وجهة النظر الكهربيه مع تكاليف أقل بكثير عن تلك اللازمة في حالات استعمال الكترودات خاصة بالتأريض.

نود أن نشدد في هذا المجال على ضرورة قياس المقاومة الأرضية عند استخدام مثل تلك الالكترودات وذلك من أجل التأكد من أنها تعطى مقاومة أرضية في الحدود المسموح بها. إن مجرد وجود تلك التجهيزات المعدنية من أنابيب مياه وخلافة لا يُعتبر أمراً كافياً لإستعمالها كالكترودات تأريض، إذ أنه من الضروري في جميع الحالات التأكد من عدم وجود انقطاع أو عدم استمرارية كهربية في تلك الأنابيب أو الأجسام المعدنية الأخرى. إن وجود عداد للمياه أو الغاز مثلاً في مسار الانبوبة المعدنية قد يسبب عدم الاستمرارية الكهربية لذلك المسار. كما أن وجود بعض الوصلات البلاستيك في تلك الأنابيب ينشأ عنه انعدام الاستمرارية الكهربية. يلزم في مثل تلك الحالات استعمال وصلات تخطى معدنية bonding jumpers عند وجود أي جسم غير معدني في مسار الأنابيب. يبين الشكل ٢ ـ ٦ هذه الفكرة. علاوة على ما سبق، فيجب أن تمتد أنبوبة الماء المستعملة كالكترود تأريض مسافة لا تقل عن ٣ متر تحت الأرض خارج المبنى.

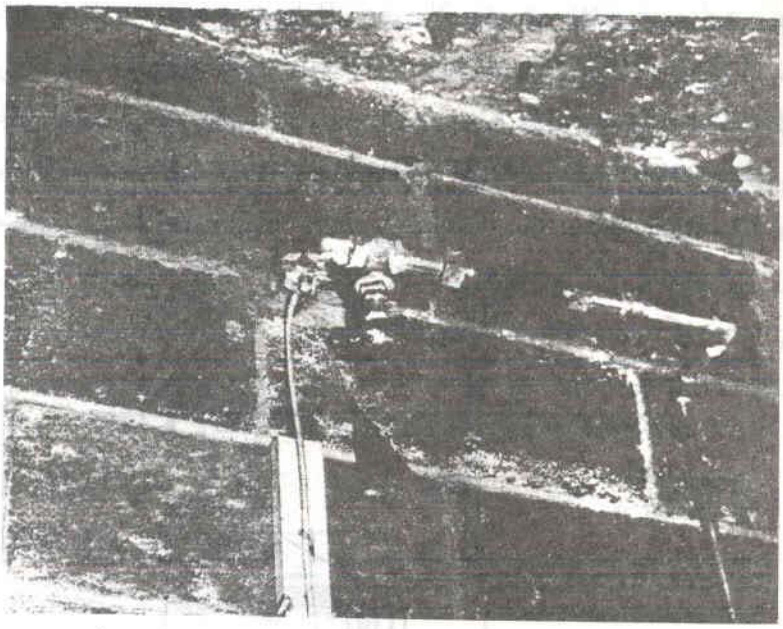
يُطلق على أنبوبة المياه التي تحقق الشروط السابقة اسم «الكترود مؤرض تأثيرياً» أو «effectively grounded water - pipe electrode».



شكل ٢ ـ ٦ تجهيز أنبوبة المياه كالكترود مؤرض تأثيرياً

في الحالات التي تكون فيها شبكة المياه الداخلية مغذاة بواسطة أنابيب غير معدنية أو أنابيب معدنية مدفونه في الأرض مسافة أقل من ثلاثة أمتار أو غير مدفونه بالمرة، فيجب استعمال الكترود تأريض خاص بالإضافة إلى شبكة أنابيب المياه الداخلية، ويلزم عمل وصلة كهربيه جيدة بين تلك الأنابيب والكترود التأريض. يبين الشكل ٢ ـ ٧ طريقة خاطئة لاستخدام أنبوبة مصدر المياه كالكترود للتأريض. لاحظ في الشكل أن أنبوبة المياه غير مؤرضة ولذلك لا يجوز استعمالها بمفردها كالكترود تأريض يمكن الإعتماد عليه.

أما بالنسبة للهياكل المعدنية في المبنى فيمكن استعمالها كالكترودات تأريض مع وجوب مراعاة أن المسافة بأن نقطة التأريض وسطح الأرض تؤثر على كفاءة منظومة التأريض كما سيأتي بيانه في البند ٢ ـ ٤.



شكل ٢ ـ ٧ استعمال خاطىء لأنبوبة مياه غير مؤرضة كالكترود تأريض.

٢ ـ ٣ ـ ٢ الالكترودات المخصصة للتأريض

توجد تلك الالكترودات على أشكال عديدة منها:

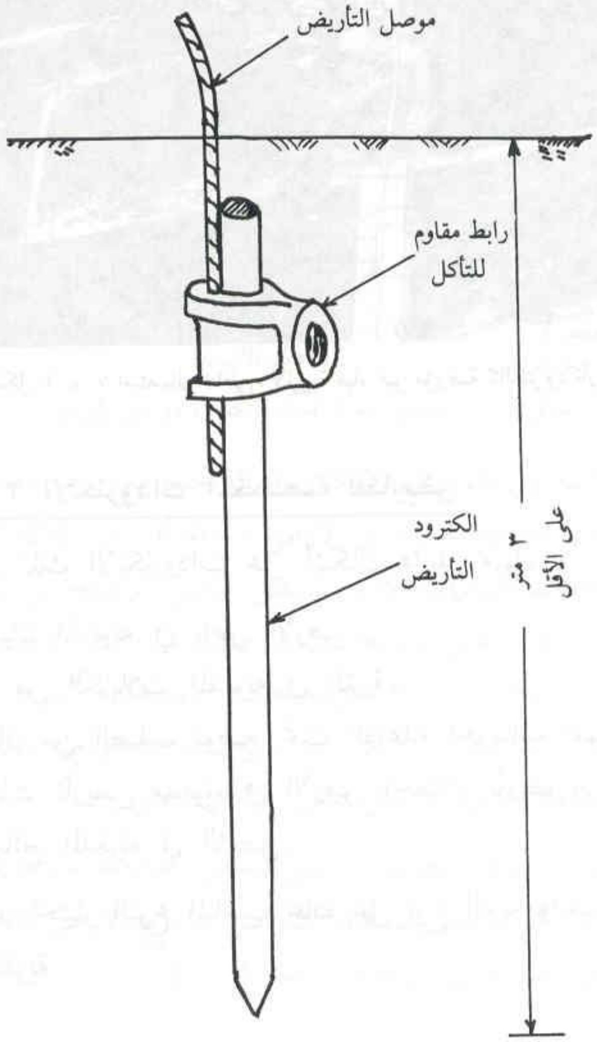
أ ـ القضبان المدفونه في باطن الأرض.
ب ـ قِطَع من الكابلات المدفونه في التربة.
جـ ـ قضبان من الصلب توضع تحت القاعدة الخرسانية للمبنى.
د ـ شبكات تأريض مدفونه في الأرض (حصائر تأريض).
هـ ـ الصفائح المدفونه في الأرض.

يعتمد اختيار النوع المناسب عادة على نوع التربة والعمق المتاح ونوع الخدمة المطلوبة.

٢ ـ ٣ ـ ٢ ـ ١ القضبان المدفونه في التربة

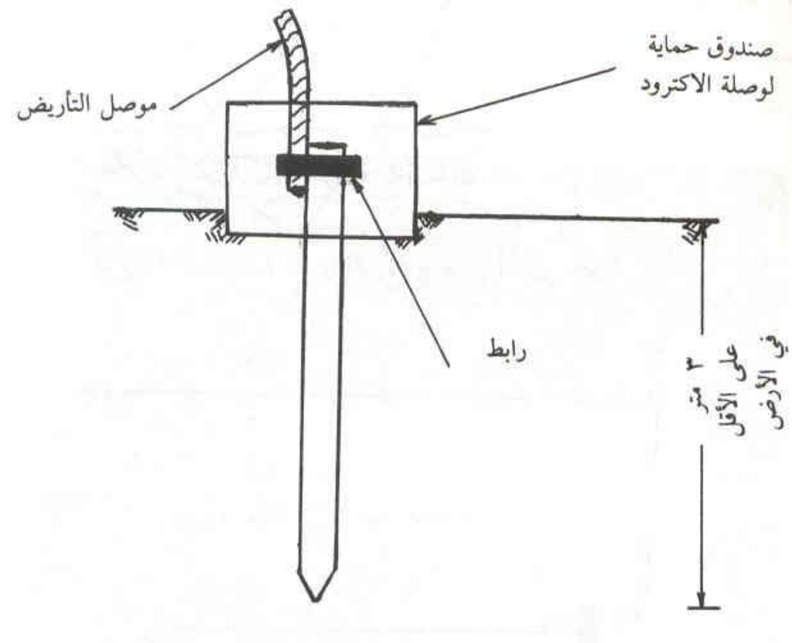
تُعتبر القضبان المدفوعة رأسياً في الأرض أنسب وأرخص أنواع الكترودات

التأريض وذلك إذا أمكن دفعها إلى عمق لا يقل عن ثلاثة أمتار تحت سطح الأرض (٢٤٠ سم في بعض المواصفات). وقضيب التأريض يكون من الصلب أو الحديد عادة ويُدفع رأسياً في باطن الأرض عن طريق الدق بواسطة مطرقة بحيث يظل سطح القضيب الخارجي ملامساً للتربة. ويمكن أن يدفن القضيب بأكمله في باطن الأرض (شكل ٢ ـ ٨ ـ أ) أو يترك طرفه بارزاً عن سطح


موصل التأريض
رابط مقاوم للتأكل
الكترود التأريض
٣ متر على الأقل

شكل ٢ ـ ٨(أ) تجهيز الكترود التأريض في باطن الأرض

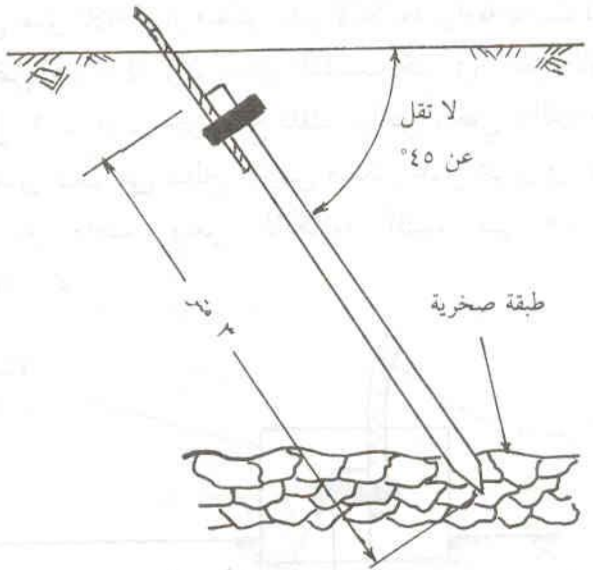
الأرض للإستدلال عليه (شكل ٢ - ٨ - ب) بشرط عمل حماية من أي تلف قد يتعرض له. أما إذا قابل الالكترود أرضاً صخرية لا يمكن الإستمرار في دفعه خلالها وذلك قبل عمق ثلاثة أمتار فيمكن دفع الالكترود بزاوية بحيث لا يقل ميله على سطح الأرض عن ٤٥° وأن يدفن القضيب كله في باطن الأرض بهذه الطريقة. الشكل ٢ - ٨ - حـ يوضح ذلك. وأخيراً، ففي حالة وجود الطبقة الصخرية على عمق صغير من سطح الأرض فيمكن عمل مجرى في الأرض على عمق حوالي متر واحد ودفن الالكترود أفقياً كما هو موضح بالشكل ٢ - ٨ - د.



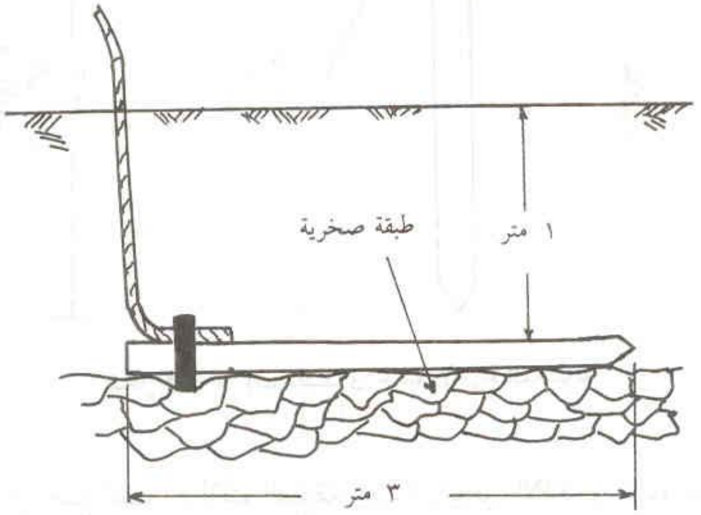
شكل ٢ - ٨ (ب) صندوق حماية الأجزاء المكشوفة

في جميع تلك الحالات السابقة يجب أن يدفن الالكترود كلية بحيث تكون نقطة اتصاله بموصل التأريض تحت سطح الأرض تماماً أو على الأقل في مستوى سطح الأرض. وفي الحالات التي يفضل فيها ترك جزء من الالكترود فوق سطح الأرض يلزم إحاطتها بصندوق معدني أو خشبي أو بلاستيك بحيث يغلّف الصندوق كل الجزء البارز عن الأرض. ويجب بطبيعة الحال أن تكون أجهزة ربط

الالكترود بسلك التأريض من مادة مقاومة للتآكل والصدأ وذلك في حالة دفن الالكترود كله في باطن الأرض.

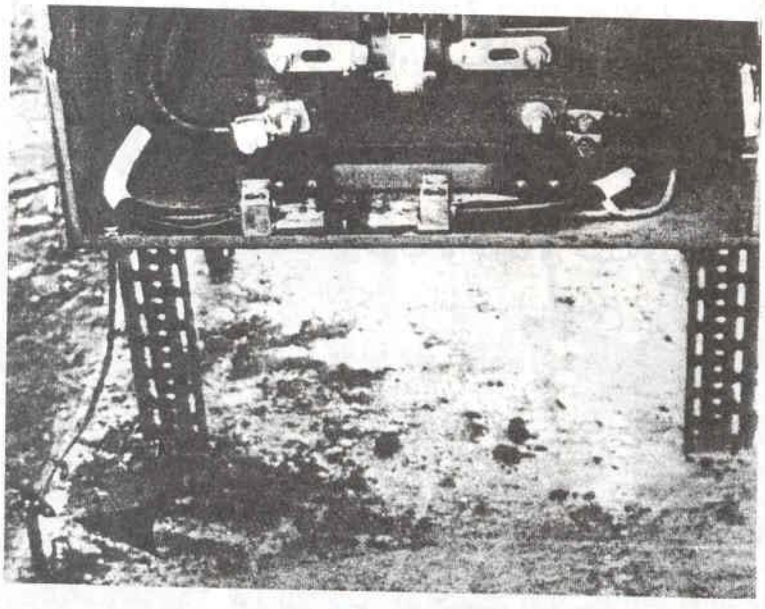

لا تقل
عن ٤٥°
٣ متر
طبقة صخرية

شكل ٢ - ٨ (جـ) دفع الالكترود مائلاً في أرض صخرية


طبقة صخرية
١ متر
٣ متر

شكل ٢ - ٨ (د) دفن الالكترود في أرض صخرية قريبة من سطح الأرض

نود الإشارة هنا إلى أن بعض أنواع التربة تسبب معدل تآكل سريعاً للالكترودات. يجب الإحتياط لتلك الظروف عن طريق الكشف الدوري على الالكترود واستبداله إذا لزم الأمر. كما أن التلامس العاري بين معدنين مختلفين مثل النحاس والحديد مثلاً قد يؤدي إلى حدوث تآكل نظراً لإختلاف الأنودية فيما بينهما كما سيأتي شرحه على التفصيل في البند ٢ - ٦. يبين الشكل ٢ - ٩ صورة لالكترود تأريض مدفوع في باطن الأرض مسافة تزيد عن ثلاثة أمتار، إلا أن العيب الأساسي الواضح في هذه العملية هو أن نهاية الالكترود وكذلك نقطة اتصالة بموصل التأريض بارزة فوق سطح الأرض وغير محمية بأي نوع من أنواع الحماية. قد يتعرض مثل هذا الالكترود للكسر نتيجة لمرور السيارات أو الأوناش أو وضع أي معدات ثقيلة عليه. كما أن موصل التأريض هو الآخر معرض لأي تلف متعمد أو نتيجة لحادث أو إهمال.



شكل ٢ - ٩ طريقة غير سليمة لتركيب الكترود تأريض.

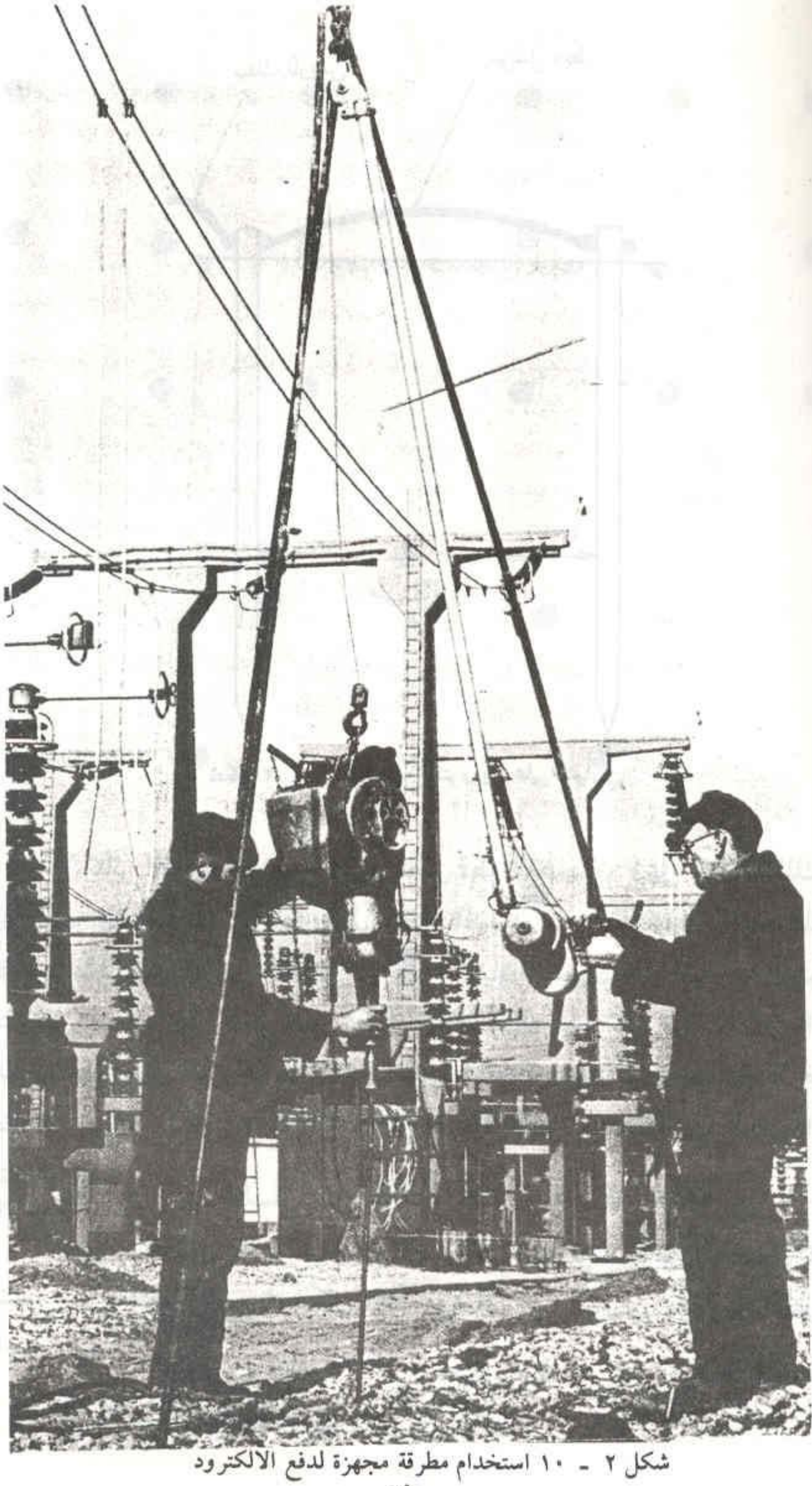
إن الأحجام القياسية المستعملة لقضبان التأريض تتراوح في الطول من متر واحد إلى ٣ متر بقطر ١٦ مللي متر رغم وجود أطوال وأقطار أخرى يتم استعمالها. يكون الالكترود عادة على شكل قضبان (أو أنابيب) من الصلب أو من

الصلب الملَبَّس بالنحاس Copper - clad steel. إن هذا النوع الأخير يجمع بين ميزتين؛ الأولى قدرة التحمل الميكانيكية اللازمة لدفع القضيب داخل التربة إلى أعماق كبيرة تصل أحياناً إلى ٣٠ متر، والميزة الثانية هي التلامس الكهربي الأفضل بين طبقة النحاس الخارجية على سطح الألكترود وبين سلك التأريض النحاس، فيمكن بذلك تجنب التآكل الكيميائي الناتج من اختلاف الأنودية وخاصة إذا كان الالكترود مدفوناً بأكمله في باطن الأرض. يجب التأكد من الإتصال الجيد بين النحاس والصلب، إذ أنه في حالة استخدام عملية البثق extrusion لتلبيس القضيب الصلب بطبقة النحاس فإن التلاصق بينهما يكون ضعيفاً من الناحية الميكانيكية مما قد يؤدي إلى إتلاف الالكترود أثناء عملية دفعه في الأرض. توجد أنواع أخرى من الكترودات التأريض مصنوعة من الصلب المجلفن.

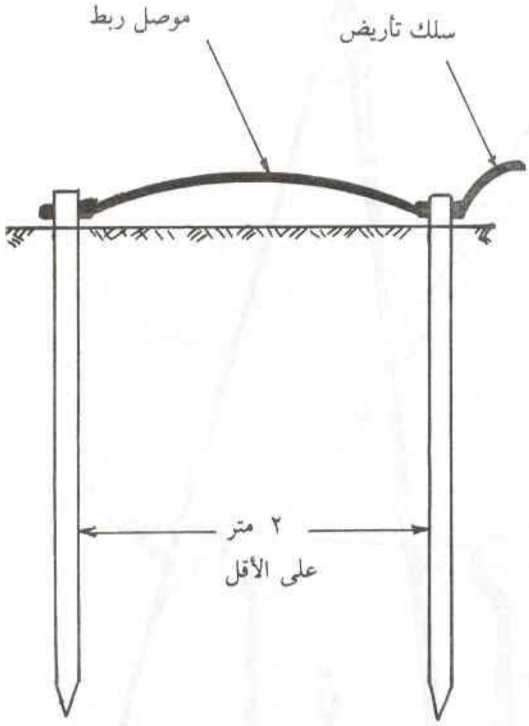
في الحالات التي تتطلب دفع الالكترود مسافة طويلة داخل الأرض يستحسن استعمال الكترود على هيئة أجزاء قياسية مفككة، وكلما تم دفع جزء بأكمله داخل الأرض يُضاف الجزء التالي إليه بواسطة قارنه coupling بهدف الحصول على موصل مستمر في النهاية.

تُستعمل عادة مطارق كهربية أو هوائية أو غيرها في عملية دفع الالكترود. يُفضل لهذا السبب أن يكون قطر الالكترود أقل قيمة مسموح بها وذلك لتقليل المقاومة الميكانيكيه من الأرض أثناء عملية دفع الالكترود. يبين شكل ٢ ـ ١٠ إحدى هذه المطارق.

يجب بعد دفع الالكترود في الأرض قياس مقاومة الأرض. تنص المواصفات القياسية الأمريكية (NEC. 250 - 84) على ألا تزيد مقاومة الأرض للالكترود الواحد عن ٢٥ أوم بينما تنص المواصفات الألمانية (VDE 0100 - 410) على ألا تزيد تلك المقاومة عن ٥ أوم. في حالة ما إذا لم يحقق دفع قضيب واحد المقاومة المطلوبة يمكن إما زيادة طول القضيب وإما استعمال قضيب تأريض آخر مع الأول بحيث لا تقل المسافة بينهما عن ٢ متر ثم يتم التوصيل بينهما كما هو مبين بالشكل ٢ ـ ١١.



شكل ٢ ـ ١٠ استخدام مطرقة مجهزة لدفع الالكترود

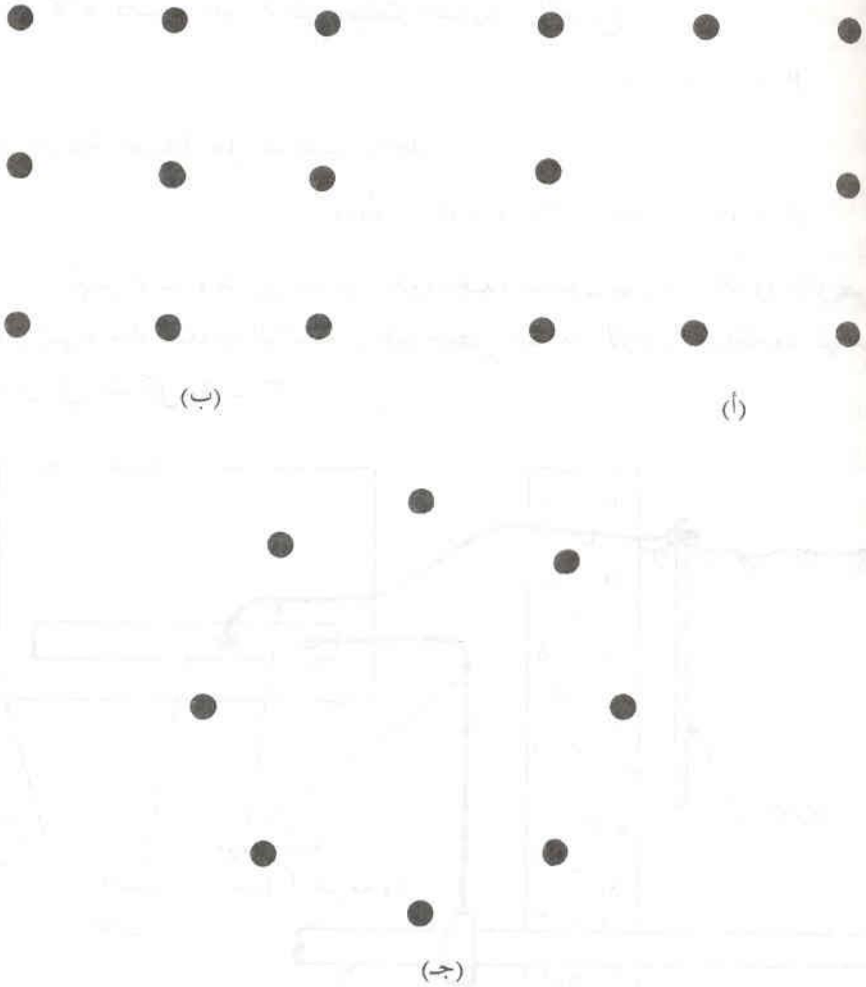


شكل ٢ ـ ١١ توصيل الكترودين على التوازي

لا تتأثر المقاومة الأرضية كثيراً بتغيير قطر القضيب، وعلى خلاف ذلك، فإن تلك المقاومة تقل بزيادة طول الجزء المدفون من الالكترود. وتبعاً لتلك القاعدة فإننا نجد أنه من الأفضل في كثير الأحيان استعمال عدد قليل من قضبان التأريض مدفونه على عمق كبير نسبياً عن استعمال عدد كبير من الالكترودات مدفونه على أعماق أقل. يكون ذلك واضحاً في حالة ما إذا كانت مساحة الأرض محدودة. يبين الشكل ٢ ـ ١٢ بعض التشكيلات المستعملة في الكترودات التأريض.

يمكن ـ علاوة على ما سبق ـ الإسترشاد بالعلاقات الآتية للحصول على النسبة بين مقاومة مجموعة الكترودات موصلة على التوازي ومقاومة الكترود واحد، حيث

P : النسبة المطلوبة.


(أ) (ب) (جـ)

(أ) مربع أجوف (ب) مربع مصمت (جـ) دائرة

شكل ٢ - ١٢ بعض التكوينات لالكترودات التأريض

α: النسبة بين نصف قطر الالكترود والمسافة بين أي الكترودين متجاورين.

أ - قضيبين

$$P = \frac{1}{2}(1 + \alpha)$$

ii - ثلاثة قضبان على مستقيم واحد

$$P = (2 + \alpha - 4\alpha^2) / (6 - 7\alpha)$$

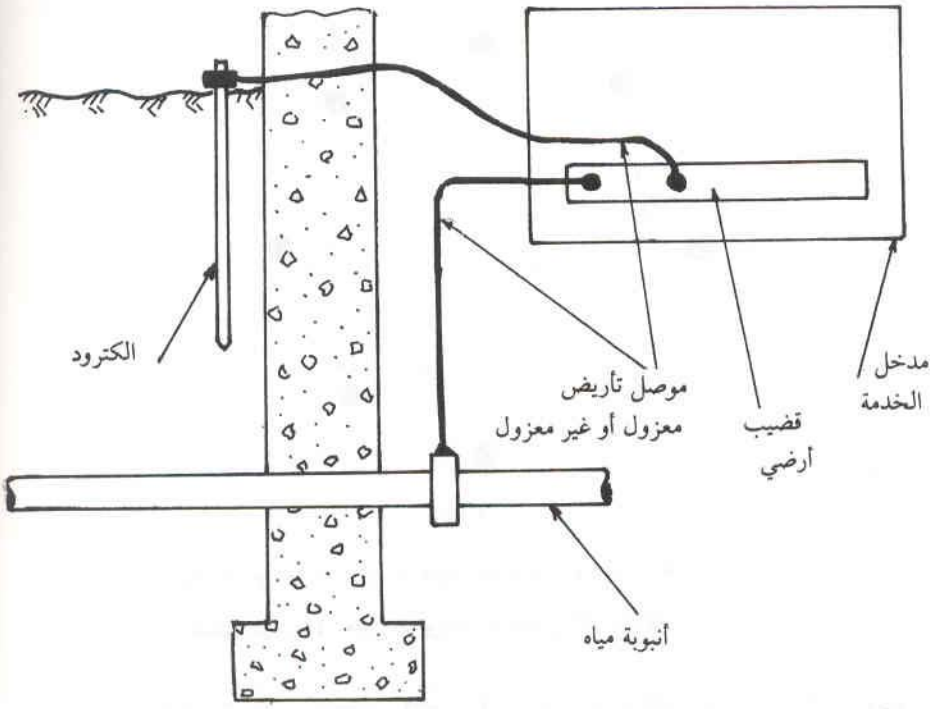
iii - ثلاثة قضبان على شكل مثلث متساوي الأضلاع

$$P = (1 + 2\alpha) / 3$$

iv - أربعة قضبان على مستقيم واحد

$$P = (12 + 16\alpha - 21\alpha^2) / (48 - 40\alpha)$$

تجدر الإشارة هنا إلى أنه من الخبرة الجيدة المعمول بها ربط الكترود التأريض مع أنبوبة مياه التغذية الرئيسية بهدف خفض المقاومة الأرضية للالكترود كما هو مبين في الشكل ٢ - ١٣.

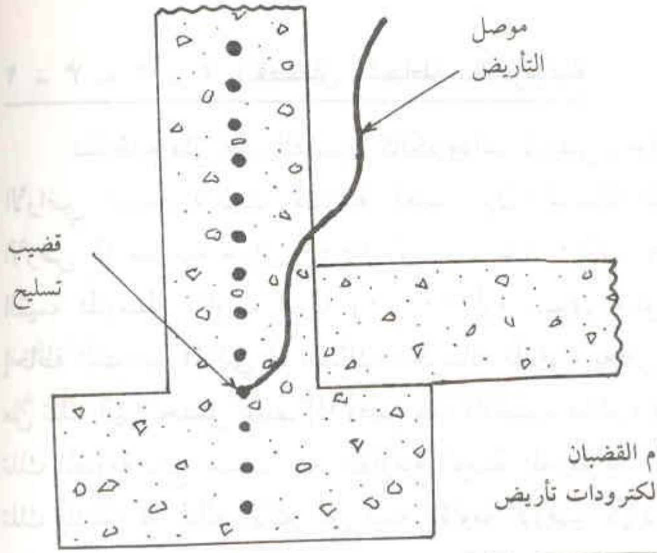

مدخل الخدمة
الكترود
موصل تأريض
معزول أو غير معزول
قضيب أرضي
أنبوبة مياه

شكل ٢ - ١٣ استعمال أنبوبة المياه مع الكترود تأريض

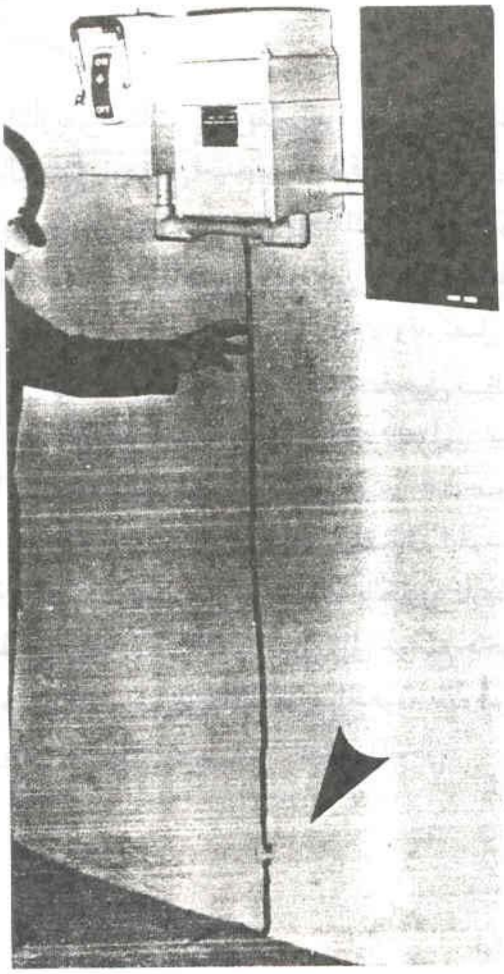
٢ - ٣ - ٢ - ٢ القضبان المحاطة بالخرسانة

تستخدم مثل هذه القضبان كالكترودات تأريض بنجاح تام وبأداء جيد في الأراضي الصخرية ذات المقاومية العالية. إن الخرسانة المسلحه المدفونة تحت الأرض لها مقاومية حوالي ٣٠٠٠ أوم.سم عند ٢٠°م، وهذه القيمة أقل من القيمة المتوسطة لمقاومية التربة (١٠٠٠٠ أوم.سم). وعلى هذا الاساس فإن إحاطة القضيب المعدني أو السلك بالخرسانة المدفونة يعطي مقاومة تأريض أقل من تلك التي نحصل عليها إذا وُضع هذا القضيب مباشرة في الأرض. إن صِغَر تلك المقاومة ناتج بسبب صِغَر مقاومية الوسط المحيط به والقريب منه حيث أن تلك المنطقة لها التأثير الأكبر على قيمة المقاومة الأرضية كما ذكرنا من قبل وكما هو واضح في (الملحق ب).

يمكن تجهيز الكترودات التأريض بتلك الطريقة أثناء عمل الخرسانة الأرضية حيث يكفي في تلك الحال عمل توصيل جيد بين أحد قضبان التسليح الرئيسية وبين موصل الأرض العمومي في المبنى. يُراعي في ذلك ألا يقل طول قضيب التسليح المستعمل كإلكترود عن ٦ متر وألا يقل قطره عن ١ سم. تعطي هذه الطريقة عادة مقاومة أرضية صغيرة تصل إلى أقل من ١ أوم، وقد تصل في كثير من الأحيان إلى حدود ٠,٢٥ أوم. تُستخدم هذه الطريقة على نطاق واسع للحصول على تأريض جيد لأبراج خطوط نقل الجهد العالي. يبين الشكل ٢ - ١٤ رسماً تخطيطياً لهذه الطريقة. ويبين الشكل ٢ - ١٥ صورة لهذا النوع من التجهيز، حيث تم توصيل موصل التأريض بقضبان الخرسانة وذلك قبل عملية صب الخرسانة، ثم تم توصيل تلك القضبان بالكترود تأريض مدفوع في باطن الأرض. لاحظ في الصورة أن السهم يشير إلى موضع دخول موصل التأريض في الخرسانة ثم خروجه منها إلى الالكترود المدفون بالأرض. لاحظ كذلك أن موصل التأريض موصل بتجهيزات خدمة المدخل.


موصل
التأريض
قضيب
تسليح

شكل ٢ - ١٤ استخدام القضبان
المحاطة بالخرسانة كالكترودات تأريض

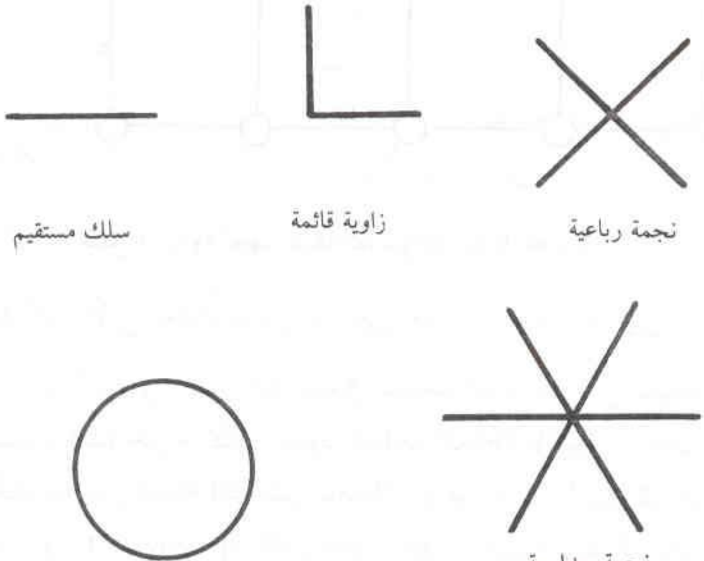


شكل ٢ - ١٥ استخدام نظام تأريض
مكون من قضيب في خرسانة
والكترود تأريض

٢ - ٣ - ٢ - ٣ الشرائح والأسلاك والكابلات المدفونة

تُستعمل شرائح معدنية أو قضبان دائرية أو موصلات مجدولة كالكترودات تأريض في الأماكن التي تكون فيها الصخور قريبة من سطح الأرض، وتسمى الكترودات سطحية surface earth electrodes حيث لا يلزم أن تدفن إلى أعماق كبيرة في باطن الأرض على خلاف الالكترودات التي تدفع في الأرض وتُعرف أحياناً بالكترودات العمق المدفوعة deep - driven earth elelctrodes .

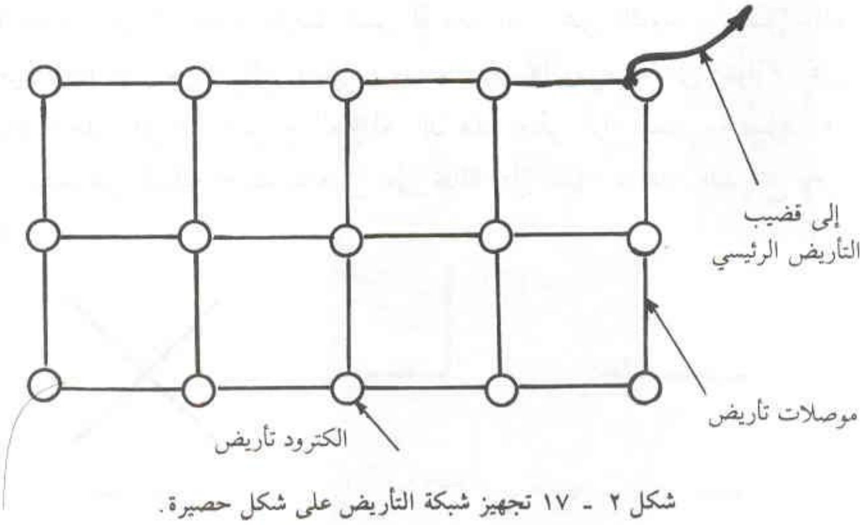
يمكن أن تكون الالكترودات السطحية على شكل إشعاعي radial أو حَلَقي ring أو متشابك mesh أو أي تكوين آخر كما هو مبين بالشكل ٢ - ١٦ . إن مقاومة الأرض لمثل هذه الالكترودات لا تتأثر كثيراً بعمق الدفن، حيث تزيد بنسبة ٥٪ فقط إذا زاد عمق الدفن من ٢/١ متر إلى متر واحد على فرض مقاومية ثابتة للتربة، كما أن حجم الموصل ليس له تأثير يذكر على المقاومة. يُفضل عادة استعمال عدد أكبر من شرائح قصيره تبعد عن بعضها وموصلة على التوازي على استخدام عدد أقل من الشرائح الطويلة. إن هذا يعطي أداء أفضل وخصوصاً في حالة الصواعق البرقية حيث نحصل على محاثة أقل كلما زاد عدد الشرائح وقل طولها.



شكل ٢ - ١٦ بعض التكوينات للأسلاك المدفونة

٢ ـ ٣ ـ ٢ ـ ٤ الشبكات المدفونة (حصائر التأريض)
Grounding Mats

هي عبارة عن مجموعة من قضبان معدنية تدفن لمسافة ١٥ سم على الأقل داخل التربة ويتم الربط بينها بواسطة كابلات نحاسية كما هو موضح بالشكل ٢ ـ ١٧ . تؤخذ المسافة بين قضبان التأريض من ٣ إلى ٤ متر تقريباً، بحيث يكون الشكل النهائي للشبكة مربعاً أو مستطيلاً . ومن الأفضل أن تمتد هذه الشبكة تحت المبنى بأكمله إلى ما بعد السور الخارجي للمبنى في حالة وجود هذا السور خصوصاً في المنشآت الصناعية. يجب توصيل أي تقاطع بين كابلات التوصيل بين الالكترودات كما يتم التوصيل بين كل من شبكة التأريض وقضيب التأريض العام للمبنى والهيكل المعدني للمبنى.

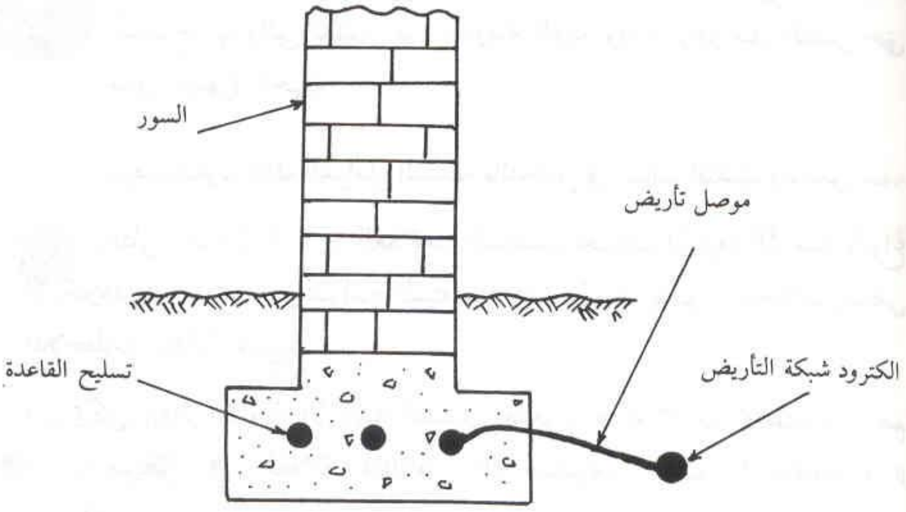


شكل ٢ ـ ١٧ تجهيز شبكة التأريض على شكل حصيرة.

إذا كان المبنى محاطاً بسور خارجي فيجب مراعاة ما يأتي:

أ ـ إذا كان السور في الحدود الداخلة في مساحة شبكة التأريض بحيث أن تلك الشبكة ممتدة خارج نطاق حدود المساحة المحاطة بالسور، فيجب في تلك الحال توصيل شبكة التأريض توصيلاً كهربياً جيداً بالسور كما هو موضح بالشكل ٢ ـ ١٨ . إن ذلك يقلل الخطر الذي قد ينشأ نتيجة لصدمة جهد كهربي ناتجة من ملامسة شخص واقف على سطح الأرض للسور،

حيث ربما تكون الطبقة السطحية للأرض الواقف عليها هذا الشخص على جهد مختلف. يسمى الجهد المسبب لتلك الصدمة بجهد اللمس touch potential.



شكل ٢ - ١٨ تأريض سور المبنى

ب - إذا كان السور خارج حدود شبكة التأريض بمسافة كبيرة بحيث لا يكون من المناسب استعمال موصل تأريض (حوالي ١,٥ متر) فيجب تأريض السور بطريقة مستقلة عن شبكة التأريض وذلك باستعمال الكترودات تأريض خاصة به.

عند تصميم شبكة التأريض يجب أخذ العوامل الآتية في الإعتبار:

أ - فرق الجهد الذي يظهر بين سطح الأرض وشبكة التأريض في فترات قصر الدائرة.

ب - يجب ألا يسبب فرق الجهد المذكور في (أ) خطورة صدمات الجهد الكهربي على الأفراد الذين قد يلامسون أجزاء معدنية غير حاملة للتيار في فترات قصر الدائرة.

جـ - يُراعي أن يسمح تيار القصر المار في شبكة التأريض بتشغيل أجهزة الحماية، ويتحقق ذلك عن طريق خفض مقاومة التأريض.

د - يراعي عند التصميم أن يقل جهد الخطوة step potential عن تلك القيمة المسموح بها والتي تعتمد على مقاومية التربة وفترة مرور تيار القصر حتى عمل أجهزة الحماية.

سوف نتناول تلك العوامل السابقة بالتحليل في الباب الثالث والملحق ب.

يعطي الجدول ٢ - ٦ العلاقات المستعملة لحساب المقاومة الأرضية لأنواع الالكترودات المختلفة. بالدراسة المستفيضة لهذا الجدول يمكن استخلاص بعض الملاحظات الهامة وهي:

i - يمكن إيجاد المقاومة الأرضية لقضيب مدفوع طوله ٣ متر وقطره ١٦ مم بالتعويض في العلاقة $(R = \rho/302)$ مباشرة، حيث R بالأوم و ρ بالأوم. سم.

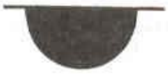
ii - بالنسبة للأسلاك المدفونة أفقياً، ولنفس طول السلك المستخدم فإن السلك المستقيم (رقم ٥ في الجدول) يعطي أقل مقاومة عن باقي تشكيلات الأسلاك الأفقية (من رقم ٦ إلى ١٠). وعلى هذا الأساس فإن تلك التشكيلات الأخيرة تستخدم عندما تكون المساحة المتاحة للتأريض محدودة.

iii - لا يُفضل - من الناحية العملية - استخدام نجمة ذات فروع أكثر من ثلاثة أو أربعة لأسباب اقتصادية.

iv - الصفائح الدائرية المدفونة (رقم ١٢ و ١٣) لها أقل كفاءة تأريض ولذلك فهي لا تُستخدم الآن كالكترودات تأريض.

جدول ٢ ـ ٦ علاقات لحساب المقاومة الأرضية بالأوم (الأبعاد بالسنتيمتر)*

١ ـ الكترود نصف كروي نصف قطره a.



$$R = \frac{\rho}{2\pi a}$$

٢ ـ قضيب مدفوع في الأرض طوله L ونصف قطره a.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} - 1\right)$$

٣ ـ قضيبان مدفوعان بينهما مسافة S و $(S > L)$.

$$R = \frac{\rho}{4\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} - 1\right) + \frac{\rho}{4\pi S}\left(1 + \frac{L^2}{3S^2} + \frac{2L^4}{5S^4} \quad \ldots\right)$$

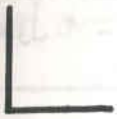
٤ ـ قضيبان مدفوعان بينهما مسافة S و $(S < L)$.

$$R = \frac{\rho}{4\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} + \ln\frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \quad \ldots\right)$$

٥ ـ سلك طوله 2L مدفون أفقياً على عمق $\frac{S}{2}$.

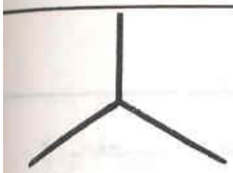
$$R = \frac{\rho}{4\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} + \ln\frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \quad \ldots\right)$$

تابع جدول ٢ - ٦



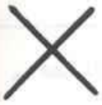
٦ - سلك زاوية قائمة، طوله الذراع L والعمق $\frac{S}{2}$.

$$R = \frac{\rho}{4\pi L}\left(\ln\frac{2L}{a} + \ln\frac{2L}{S} - 0.2373 + 0.2146\,\frac{S}{L} + 0.1035\,\frac{S^2}{L^2} + 0.0424\,\frac{S^4}{L^4}\ldots\right)$$



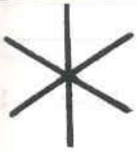
٧ - نجمة ثلاثية، طول الذراع L والعمق $\frac{S}{2}$.

$$R = \frac{\rho}{6\pi L}\left(\ln\frac{2L}{a} + \ln\frac{2L}{S} + 1.071 - 0.209\,\frac{S}{L} + 0.238\,\frac{S^2}{L^2} - 0.054\,\frac{S^4}{L^4}\ldots\right)$$



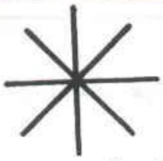
٨ - نجمة رباعية، طول الذراع L والعمق $\frac{S}{2}$.

$$R = \frac{\rho}{8\pi L}\left(\ln\frac{2L}{a} + \ln\frac{2L}{S} + 2.912 - 1.071\,\frac{S}{L} + 0.645\,\frac{S^2}{L^2} - 0.145\,\frac{S^4}{L^4}\ldots\right)$$



٩ - نجمة سداسية، طول الذراع L والعمق $\frac{S}{2}$.

$$R = \frac{\rho}{12\pi L}\left(\ln\frac{2L}{a} + \ln\frac{2L}{S} + 6.851 - 3.128\,\frac{S}{L} + 1.758\,\frac{S^2}{L^2} - 0.490\,\frac{S^4}{L^4}\ldots\right)$$



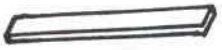
١٠ - نجمة ثمانية، طول الذراع L والعمق $\frac{S}{2}$.

$$R = \frac{\rho}{16\pi L}\left(\ln\frac{2L}{a} + \ln\frac{2L}{S} + 10.98 - 5.51\,\frac{S}{L} + 3.26\,\frac{S^2}{L^2} - 1.17\,\frac{S^4}{L^4}\ldots\right)$$

تابع جدول ٢ ـ ٦

١١ ـ حلقة من السلك، قطر الحلقة D وقطرالسلك d وعمق الدفن $\frac{S}{2}$.

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{S} \right)$$

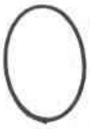


١٢ ـ شريحة مدفونة أفقياً، الطول L ـ المقطع (b × a) والعمق $\frac{S}{2}$.

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2\,(a + b)^2} - 1 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \; \dots \right)$$

١٢ ـ صفيحة دائرية مدفونة أفقياً، نصف القطر a والعمق $\frac{S}{2}$.

$$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{S^2} + \frac{33}{40} \frac{a^4}{S^4} \dots \right)$$



١٣ ـ صفيحة دائرية مدفونة رأسياً، نصف القطر a والعمق $\frac{S}{2}$.

$$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 + \frac{7}{24} \frac{a^2}{S^2} + \frac{99}{320} \frac{a^4}{S^4} \; \dots . \right)$$

* علاقات تقريبية حيث ρ مقاومية الأرض أوم ـ سنتيمتر.

٢ ـ ٣ ـ ٣ قياس مقاومة الكترود التأريض

يجب قياس مقاومة التأريض بعد عملية وضع الالكترود في الأرض. كما يجب إجراء قياسات دورية كل عام أو عامين للإطمئنان على قيمة تلك المقاومة. توجد عدة طرق مختلفة لإجراء تلك القياسات أكثرها دقة هي الطريقة المعروفة باسم طريقة الهبوط في الجهد fall - of - potential method. يمكن في هذه الطريقة استخدام الجهاز المستخدم في قياس المقاومية الأرضية والمبين بالشكل ٢ ـ ٤. ويتم إجراء القياس على النحو التالي:

i - يوصل طرف الجهد P_1 في الجهاز مع طرف التيار C_1 ثم يتم توصيلهما بالالكترود المراد قياس مقاومته بحيث يكون جهاز القياس عند هذا الالكترود.

ii - يوصل طرف التيار C_2 بالكترود تأريض مساعد يدفع في الأرض إلى حوالي من ٣٠ إلى ٦٠ سم، بحيث يكون على مسافة لا تقل عن ٤٠ متراً عن الكترود التأريض الأصلي.

iii - يوصل طرف الجهد P_2 بالكترود تأريض مساعد آخر مشابه للألكترود المذكور في ii بحيث تكون المسافة بين الالكترود المتصل بالطرف P_2 وبين الكترود التأريض الأصلي مساوية لِـ ٦١,٨٪ من المسافة بين الالكترود المتصل بالطرف C_2 والكترود التأريض الأصلي. إن تلك النسبة تضمن عدم حدوث أي خطأ في نتائج التجربة.

iv - يولِّد الجهد بإدارة الجهاز وتُقرأ مقاومة الالكترود مباشرة على الجهاز.

ويجب مراعاة الآتي.

i - لا تقل المسافة بين الكترود التأريض والكترود التيار المساعد المتصل بالطرف C_2 عن ٢٠ متراً بأي حال وإلا فإن ذلك سوف يؤثر على دقة النتيجة. وكلما زادت المسافة كلما كانت القراءة أقرب إلى الدقة.

ii - في حالة وجود شبكة أنابيب مياه بالقرب من الالكترودين المساعدين المتصلين

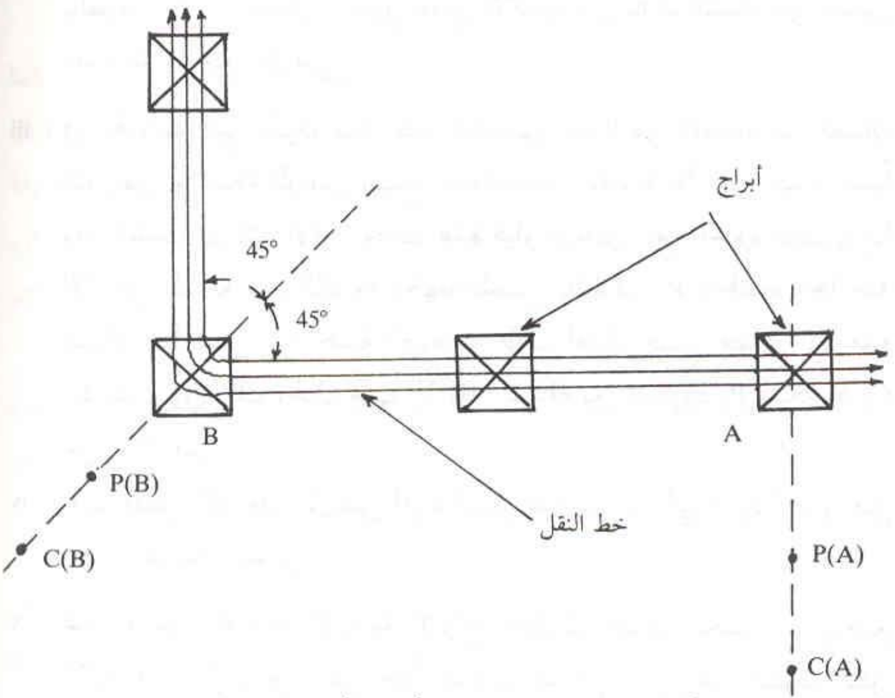
بالطرفين C_2, P_2 فيمكن توصيل هذين الالكترودين بتلك الشبكة على أساس اعتبارها المرجع الأرضي.

iii - في الحالات التي يكون فيها نظام التأريض مكوناً من مجموعة من قضبان التأريض أو شبكة تأريض تصبح عملية قياس المقاومة الأرضية صعبة نسبياً وقد تتطلب أن تمتد الالكترودات عدة كيلو مترات. ومن الخبرة المعمول بها ألا تقل المسافة بين الكترود الجهد المتصل بالطرف P_2 والحدود الخارجية لشبكة التأريض عن خمسة أضعاف طول أطول ضلع قطري في هذه الشبكة. وفي تلك الحال يجب ألا تقل المسافة بين الكترود P_2 والكترود C_2 عن ٣٠ متراً.

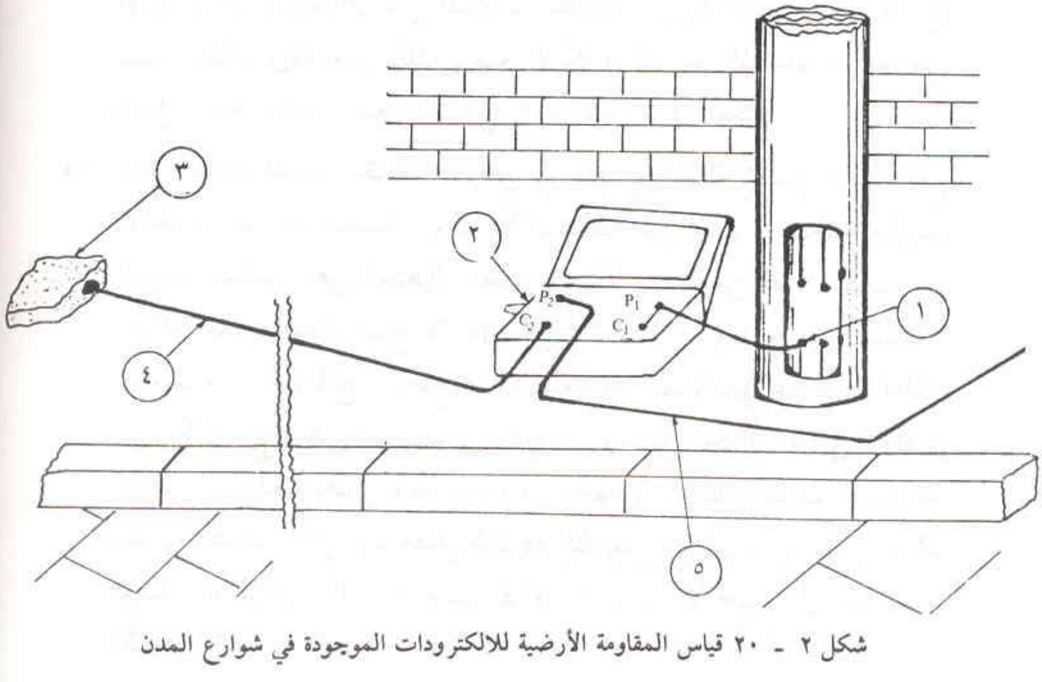
iv - يجب فصل الكترود التأريض المراد قياس مقاومته عن أي دائرة أخرى قبل إجراء عملية القياس.

v - عند قياس المقاومة الأرضية لأبراج خطوط القوى يجب أن يوضع الالكترودان المساعدان على خط مستقيم عمودي على إتجاه خطوط النقل وذلك لتفادي الخطأ الناتج عن الحث التبادلي. وفي حالة برج الزاوية يوضع الالكترودان المساعدان على المستقيم المنصف للزاوية الخارجية من خارج مسار الخط، وإذا تعذر ذلك يوضع الالكترودات على المنصف للزاوية من داخل مسار الخط. يبين الشكل ٢ ـ ١٩ هذه الفكرة.

vi - عند الحاجة لقياس مقاومة الأرض في شوارع المدينة تصبح عملية دفع الالكترودات غير مناسبة. يمكن الإستعاضة عن ذلك باستخدام طريقة تقريبية للقياس وهي استعمال قطعة سميكة مكونة من عدة طبقات من القماش مربعة بطول ضلع لا يقل عن ٣٠ سم(٣)، وتشبع هذه القطعة. بمحلول من الماء والملح. توضع هذه القطعة على بعد لا يقل عن ثمانية أمتار(٤) من الكترود التأريض المراد قياس مقاومته(١) وتوصل بجهاز القياس(٢) وتعتبر كأرض مساعدة (توصل بالطرف C_2 من الجهاز). يوصل الطرف P_2 بطريقة مشابهة للطرف C_2(٥). يتم فصل الكترود التأريض عن أي دائرة متصل بها ثم يوصل بالطرفين C_1, P_1 وتتم قراءة المقاومة الأرضية كما هو مبين بالشكل ٢ ـ ٢٠.

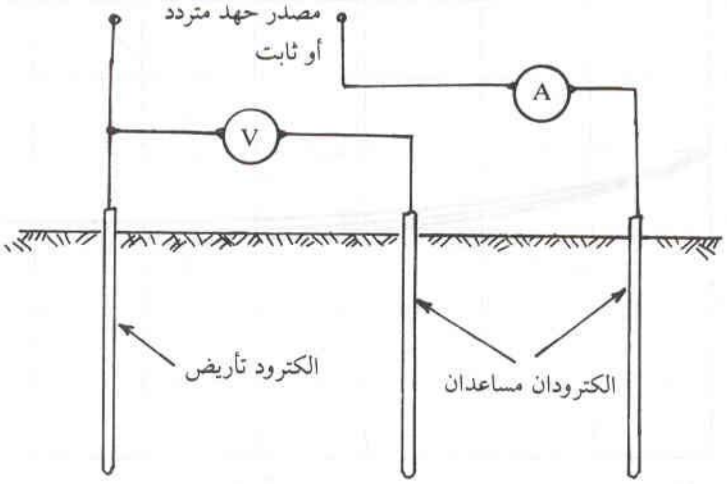

أبراج
45°
45°
B
A
P(B)
C(B)
خط النقل
P(A)
C(A)

شكل ٢ ـ ١٩ قياس المقاومة الأرضية لأبراج النقل الكهربي


٣
٢
P2
C2
P1
C1
١
٤
٥

شكل ٢ ـ ٢٠ قياس المقاومة الأرضية للالكترودات الموجودة في شوارع المدن

vii - في حالة عدم وجود جهاز خاص بالقياس يمكن استخدام أميتروفولتميتر مع استخدام مصدر جهد متردد عادي. يمكن كذلك إستخدام مصدر جهد ثابت كما هو مبين بالشكل ٢ - ٢١.



شكل ٢ - ٢١ قياس مقاومة الكترود باستخدام مصدر جهد متاح

٢ - ٣ - ٤ تحسين مقاومة التأريض

ذكرنا فيما سبق أنه يمكن خفض المقاومة الأرضية بعدة طرق. يمكن حصر تلك الطرق فيما يأتي:

i زيادة قطر الكترود التأريض.

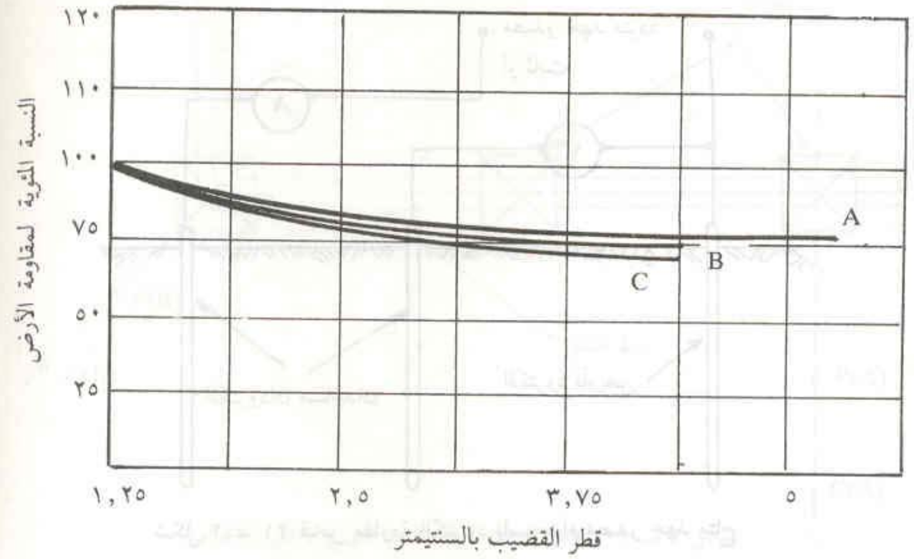
ii زيادة طول الكترود التأريض.

iii - إستخدام مجموعة من الكترودات التأريض.

iv - المعالجة الكيميائية للتربة.

إن زيادة قطر الالكترود ليس له تأثير كبير على خفض مقاومة التأريض كما هو واضح من الشكل ٢ - ٢٢. وعلى ذلك فإن اتباع تلك الطريقة غير مستحب ولا يُوصى باستخدام قضبان تأريض بأقطار أكبر من ١٩ مم. إن الذي يحدد قطر قضيب التأريض هو المتطلبات الميكانيكية فقط كما أشرنا إلى ذلك

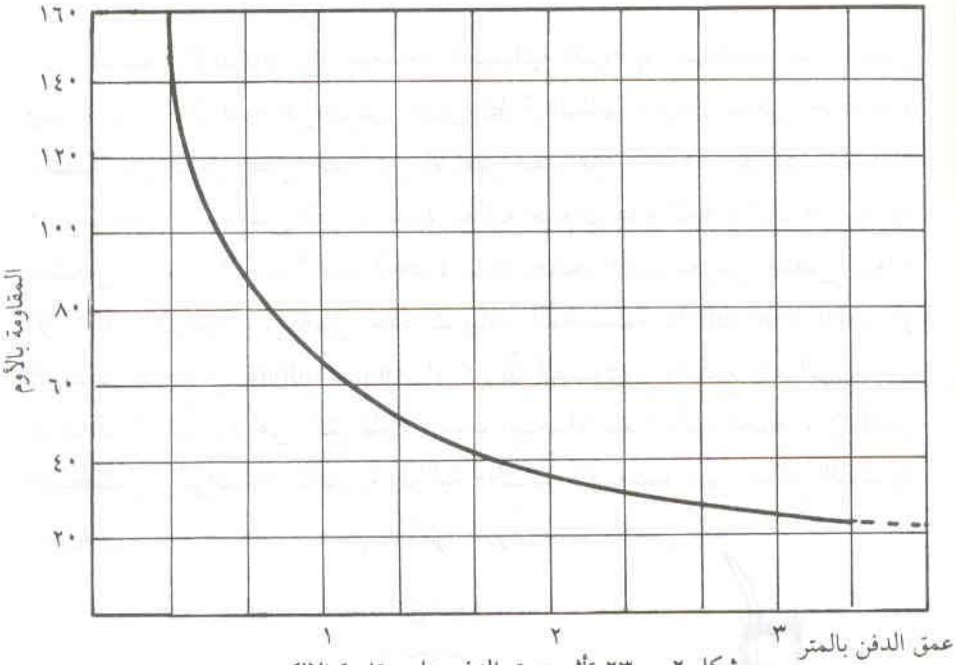
من قبل. في الشكل ٢ ـ ٢٢ إعتبرنا أن قضيباً قطره ١,٢٥ سم يحقق مقاومة تأريض ١٠٠٪، والمنحنيات A و B و C لقضبان مختلفه مع تغيير قطر كل قضيب وقياس المقاومة الأرضيه له.



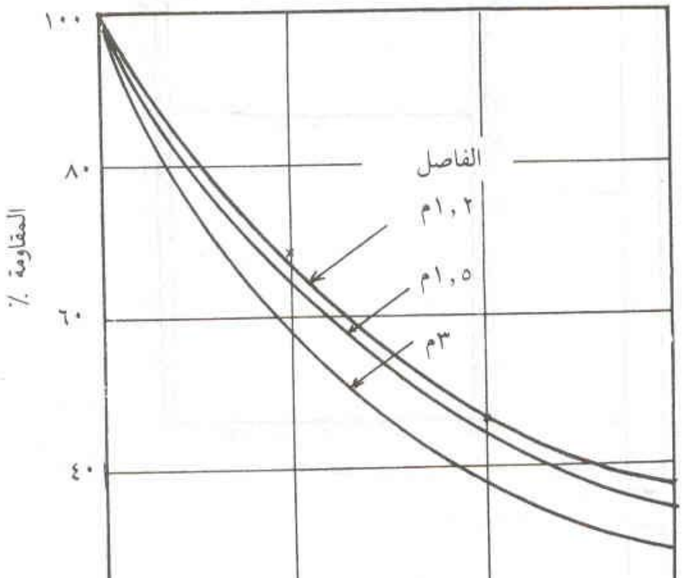
شكل ٢ ـ ٢٢ تأثير تغيير قطر الالكترود على المقاومة الأرضية

إن زيادة طول قضيب التأريض له تأثير ملحوظ على خفض المقاومة الأرضية. يبين الشكل ٢ ـ ٢٣ تأثير عمق الدفن على أحد الالكترودات القياسية. المنحني المرسوم هو نتائج حسابات نظرية على أساس أن مقاومية التربة لا تتغير عند كل الأعماق، أما في الحالة الواقعية فإن التربة تكون أشد تماسكاً وأكثر إحتواء للرطوبة كلما زاد العمق مما يؤدي إلى خفض مقاومة التأريض الناتجة عند تلك الموجودة على المنحنى.

ذكرنا من قبل أن استعمال الكترودات على التوازي من شأنه أن يخفض المقاومة الكلية للتأريض، علاوة على ذلك فإن المسافة بين الالكترودات المتوازية لها تأثير أيضاً على خفض تلك المقاومة كما هو واضح من الشكل ٢ ـ ٢٤.

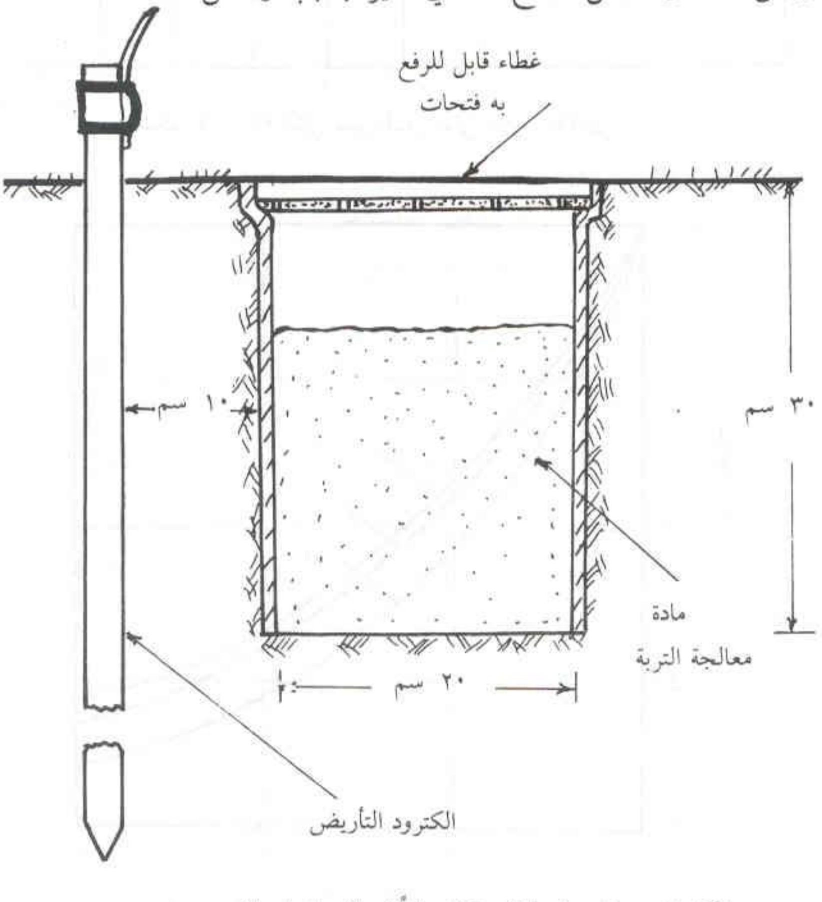


شكل ٢ - ٢٣ تأثير عمق الدفن على مقاومة الالكترود



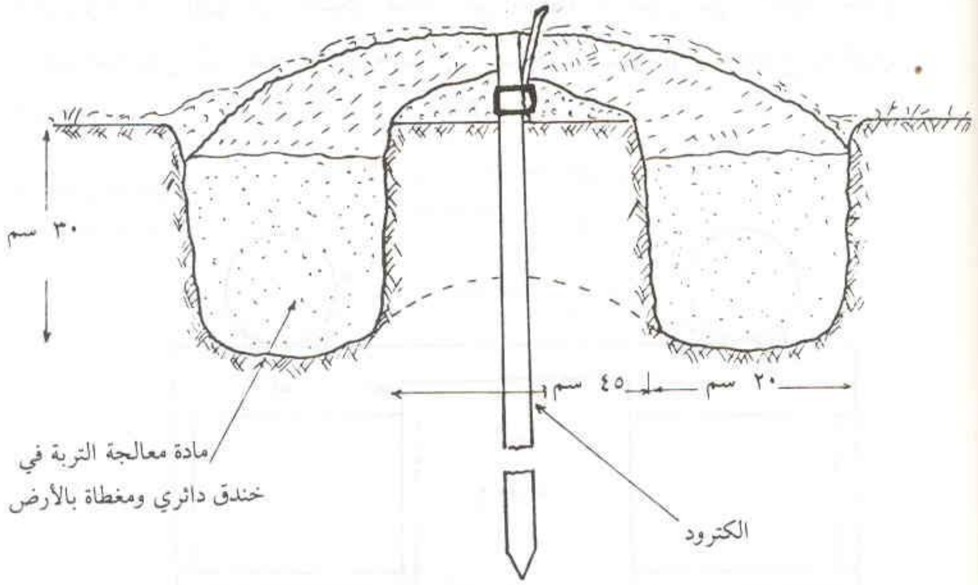
شكل ٢ - ٢٤ تأثير عدد مضاعفات القضبان على مقاومة الأرض

يُنصح بالالتجاء إلى المعالجة الكيميائية للتربة إذا لم نتمكن من خفض قيمة المقاومة الأرضية عن طريق إحدى الطرق السابق ذكرها. يمكن إجراء هذه العملية عن طريق عمل حفرة في الأرض تبعد عن الكترود التأريض بمسافة ١٠سم تقريباً ويُستعمل القرميد عادة لتغطية جدران هذه الحفرة كما هو موضح بالشكل ٢ ـ ٢٥. تُملأ هذه الحفرة بمادة معالجة التربة بغرض خفض مقاومة الالكترود الأرضية. يستعمل عادة كبريتات المغنسيوم magnesium sulfate أو كبريتات النحاس copper sulfate أو كلويد الصوديوم (الملح العادي). إن كبريتات المغنسيوم هي أكثر تلك المواد استعمالاً نظراً لأنها تجمع بين الثمن المنخفض والتوصيلية الكهربية العالية والتأثير الضعيف على تآكل الكترود التأريض. كما يستعمل الملح العادي كثيراً بسبب رخص ثمنه.



شكل ٢ ـ ٢٥ معالجة التربة كيميائياً في المساحات المحدودة

إن الطريقة السابقة تكون مناسبة في المساحات المحدودة كما في حالة شوارع المدن. يمكن كذلك حفر خندق دائري أو نصف دائري حول الكترود التأريض ووضع المادة المعالجة فيه وذلك في حالة توافر المساحة وإمكانية حفر مثل هذا الخندق كما هو موضح بالشكل ٢ ـ ٢٦.



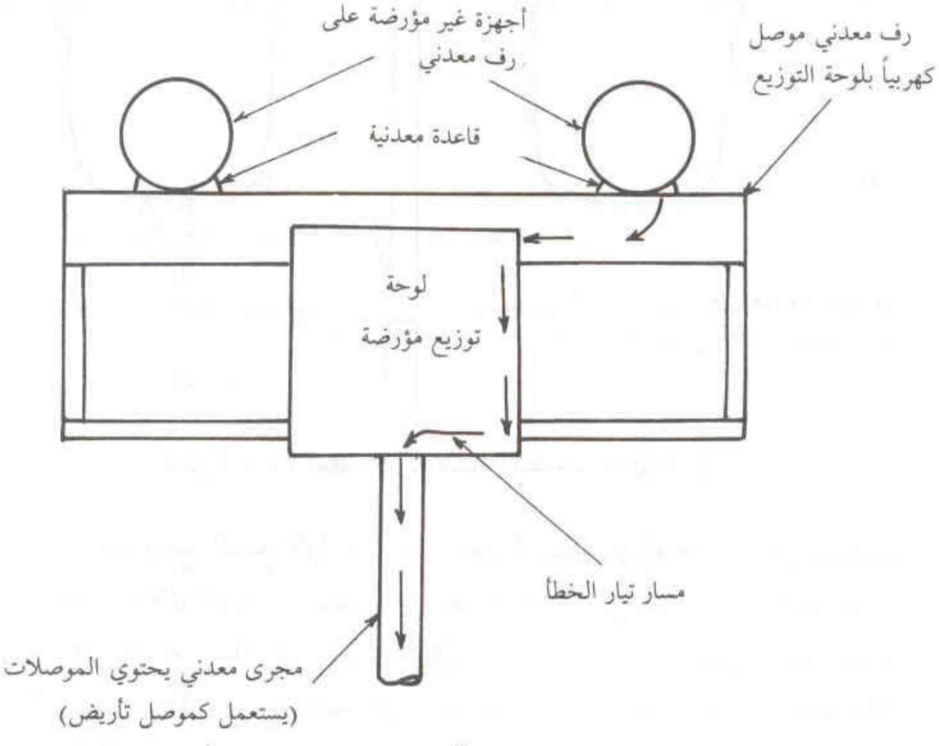
شكل ٢ ـ ٢٦ معالجة التربة كيميائياً باستعمال خندق دائري

عند وضع الملح لأول مرة يجب غمر المنطقة بالماء حتى يمكن للمحلول أن ينتشر خلال التربة. ويستمر تأثير تلك المعالجة من سنتين إلى ثلاث سنوات ثم يعاد إضافة الملح مرة أخرى. يؤثر ماء المطر العادي على عملية إنتشار المحلول، وعلى هذا فيجب إجراء التفتيش الدوري على المادة المعالجة كل فترة للتأكد من وجودها وعدم تسربها كلية.

٢ ـ ٤ موصلات التأريض

من المطلوب أساساً توصيل الأجهزة المراد تأريضها بالكترودات التأريض عن طريق موصلات التأريض. يمكن أن تكون موصلات التأريض عبارة عن أسلاك أو كابلات مخصصة لهذا الغرض. ويمكن كذلك استخدام الهياكل

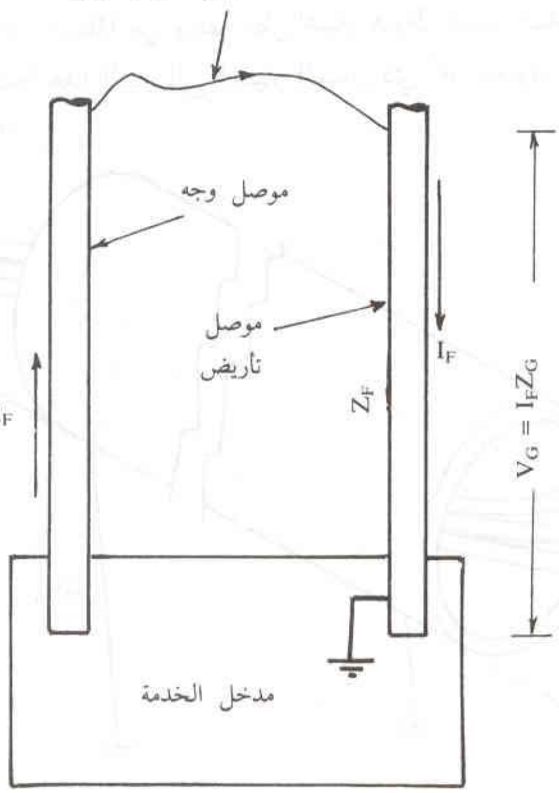
المعدنية كموصلات تأريض إذا كانت متصلة إتصالاً كهربياً جيداً مع الأرض. مثال ذلك وضع بعض الأجهزة على الحوامل والأرفف المعدنية الموصلة كهربياً بالأرض كما هو موضح بالشكل ٢ ـ ٢٧. ويجب في تلك الحال ألا يكون مسار تيار الخطأ كبيراً حتى لا يتسبب في رفع جهد الجهاز المؤرض عن الحد المسموح به. يظهر في الشكل مسار تيار الخطأ الأرضي على الجهاز خلال الرف المعدني إلى لوحة التوزيع ثم إلى المجرى المعدني الموصل بالكترود التأريض.


أجهزة غير مؤرضة على رف معدني
رف معدني موصل كهربياً بلوحة التوزيع
قاعدة معدنية
لوحة توزيع مؤرضة
مسار تيار الخطأ
مجرى معدني يحتوي الموصلات (يستعمل كموصل تأريض)

شكل ٢ ـ ٢٧ استخدام الأرفف المعدنية كموصلات تأريض

إن موصل التأريض له تأثير كبير على رفع جهد الجهاز المؤرض عند حدوث القصر الأرضي، حيث تساهم معاوقة الموصل في إيجاد فرق جهد بين الجهاز وبين الكترود التأريض. يوضح الشكل ٢ ـ ٢٨ هذه الحقيقة حيث يرتفع الجهد عند الجهاز المؤرض بمقدار ($V_G = I_F . Z_G$)، حيث I_F تيار القصر في موصل التأريض وZ_G معاوقة موصل التأريض. علاوة على ما سبق

فإن استخدام الهياكل والمنشآت المعدنية الخاصة بالمبنى كموصلات تأريض أمر غير مسموح به في أغلب الحالات (NEC 250 - 58)، حيث أن مسارات تلك الهياكل تكون طويلة عادة وغير محددة مما يرفع الجهد بين نقطة القصر والأرض.

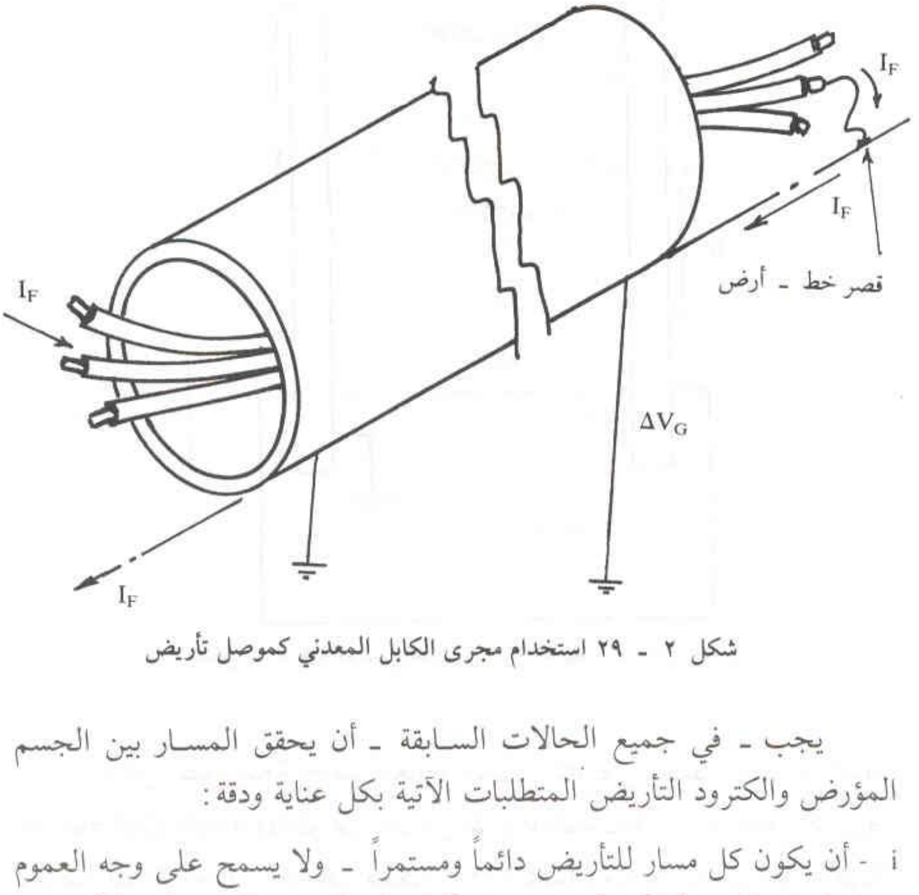


شكل ٢ ـ ٢٨ موصل التأريض يرفع الجهد عند نقطة القصر

يمكن بصفة عامة خفض معاوقة موصل التأريض بخفض محاثته التبادلية مع موصلات الوجه وذلك عن طريق تقريب المسافة بين موصل التأريض وموصلات الوجه إلى أقل قدر ممكن. إن استعمال موصل تأريض في مكونات الكابل بحيث يحتوي الكابل على موصلات الوجه وموصل التأريض يجعل المسافة بين تلك الموصلات تقل إلى حد التلامس تقريباً. علاوة على ما سبق فإنه يمكن زيادة خفض مفاعلة موصل التأريض عن طريق توزيع مساحة

التوصيل المطلوبة منه على ثلاثة موصلات تأريض كل منها له ثلث تلك المساحة.

تجدر الإشارة هنا إلى أن استخدام الغلاف المعدني الخارجي للكابل كموصل تأريض يحيط بموصلات الوجه وموصل التعادل أو إستخدام المجاري المعدنية يعطي أداء ممتازاً من وجهة نظر اعتبار هبوط الجهد الناشيء من تيار القصر، حيث يلجأ هذا التيار إلى اختيار المسار ذي أقل معاوقة كما هو مبين بالشكل ٢ - ٢٩.



شكل ٢ - ٢٩ استخدام مجرى الكابل المعدني كموصل تأريض

يجب - في جميع الحالات السابقة - أن يحقق المسار بين الجسم المؤرض والكترود التأريض المتطلبات الآتية بكل عناية ودقة:

أ - أن يكون كل مسار للتأريض دائماً ومستمراً - ولا يسمح على وجه العموم بوضع مفاتيح أو أي أجهزة فصل أو قطع للدائرة على مسار التأريض. ويجب مراعاة استمرارية المسار والتأكد من ذلك عن طريق إجراء أي نوع من أنواع القياس أو المراجعة أو الكشف، كاستخدام أميتر أو ڤولتميتر مثلاً، أو الكشف بواسطة مصباح أو جرس للتأكد من استمرارية المسار.

ii - يجب ألا يتسبب موصل التأريض في زيادة معاوقة الدائرة الأصلية أو دائرة التأريض بصورة كبيرة.

iii - يجب ألا يؤثر موصل التأريض على قيمة تيار القصر بحيث يمنع أو يؤخر عمل أجهزة الحماية.

iv - لا يُسمح عادة بإستخدام موصلات تأريض من الألومنيوم إلا إذا كان عليها طبقة من الغطاء أو الحماية الخارجية. وفي حالة موصلات التأريض المدفونة في الأرض فإنه يجب أن يكون موصل التأريض عبارة عن كابل ذي قلب نحاسي وعليه طبقة من الحماية الخارجية لمقاومة التآكل الكيميائي والرطوبة. ولا يسمح بإستخدام موصلات الألومنيوم بأية حال داخل التربة.

v - يجب أن تتميز موصلات التأريض المدفونة بقدر كبير من المرونة والشدة الميكانيكية، حيث تتعرض تلك الموصلات عادة لظروف تشغيل وظروف بيئية قاسية (أنظر الشكل ٢ - ٣٠). وعلى ذلك فإنه من الأفضل إستخدام الموصلات المجدولة ذات المرونة العالية.

vi - يجب أن يكون لمسار التأريض القدرة على حمل وتوصيل أقصى تيار قصر أرضي ممكن حدوثه وذلك لفترة زمنية كافية إلى حين عمل أجهزة الحماية والقطع دون حدوث أية مخاطر. وعلى ذلك فإن اختيار المقطع المناسب لموصل التأريض أمر حيوي. يتم إختيار مساحة مقطع موصل التأريض بإحدى الطرق الآتية:

أ - تبعاً لمساحة مقطع موصل الوجه المغذي للأحمال (الجدول ٢ - ٧).

ب - تبعاً لقيمة أقصى تيار قصر أرضي وفترة دوام ذلك القصر (جدول ٢ - ٨).

جـ - تبعاً لمقننات أجهزة حماية تجاوز التيار (جدول ٢ - ٩).

لعل استخدام الجدول ٢ - ٩ هو أكثر الطرق شيوعاً واسهلها استخداماً، حيث يتم تحديد مساحة مقطع موصل التأريض تبعاً لمقنن جهاز حماية الدائرة مباشرة. فعلى سبيل المثال، إذا كان الحمل مغذًى من دائرة واحدة وكان مقنن

شكل ٢ ـ ٣٠ موصلات تأريض مدفونة في الأرض ومتصلة ببعضها بلحام طارد للحرارة

جهاز حماية تجاوز التيار ٦٠ أمبير مثلاً، فإن مساحة مقطع موصل التأريض اللازم هو ٥مم^{٢} نحاس أو ٨مم^{٢} الومنيوم على الأقل.

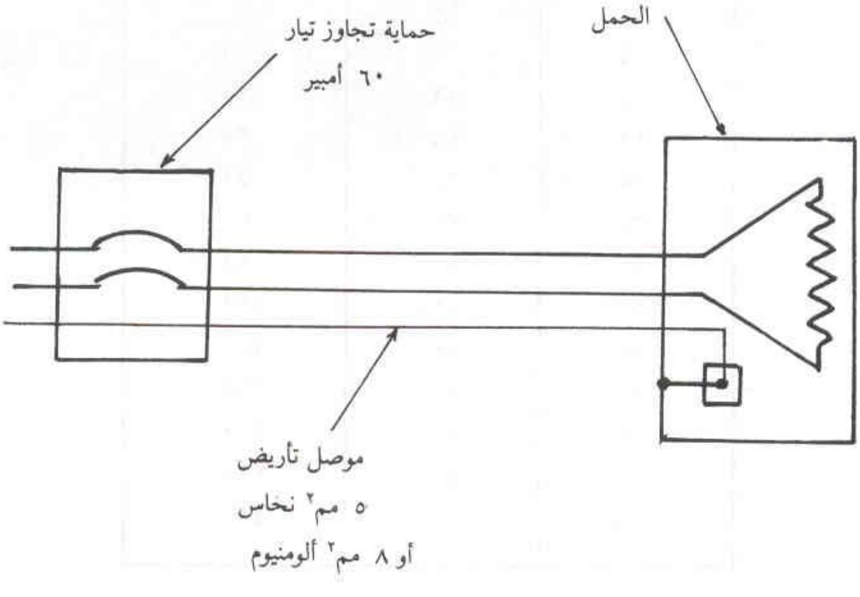
ويتم اختيار مساحة المقطع المناسب أو المقطع المتاح في السوق الأكبر منه مباشرة. أما إذا كان الحمل مغذًى بواسطة دائرتي تغذية على التوازي بحيث أن لكل دائرة تغذية موصل تأريض مستقل، فإنه يجب أن يتم اختيار مساحة مقطع موصل التأريض تبعاً لمقنن جهاز الحماية الرئيسي المسئوول عن حماية الدائرتين معا، وليس تبعا للتيار المار في كل دائرة. لنفرض على سبيل المثال أن حملاً يتم تغذيته بدائرتين على التوازي وأن مقنن جهاز الحماية الرئيسي هو ٨٠٠ أمبير. يتم في هذه الحال اختيار مساحة مقطع موصل التأريض لكل دائرة بحيث يكون ٥٣ مم^{٢} نحاس أو ٨٥ مم^{٢} الومنيوم. يبين الشكلان ٢ ـ ٣١ و ٢ ـ ٣٢ هذه القاعدة.

جدول ٢ ـ ٧ العلاقة بين موصل التأريض وموصل الوجه

مساحة المقطع . (مللي متر مربع)		
موصل الوجه	موصل التأريض	
	نحاس/الومنيوم طبقة حماية	نحاس بدون طبقة حماية
١,٥	٤/٢,٥	٤
٢,٥	٤/٢,٥	٤
٤	٤	٤
٦	٦	٦
١٠	١٠	١٠
١٦	١٦	١٦
٢٥	١٦	١٦
٣٥	١٦	١٦
٥٠	٢٥	٢٥
٧٠	٣٥	٣٥
٩٥	٥٠	٥٠
١٢٠	٥٠	٥٠
١٥٠	٥٠	٥٠
١٨٥	٥٠	٥٠
٢٤٠	٥٠	٥٠
٣٠٠	٥٠	٥٠
٤٠٠	٥٠	٥٠

جدول ٢ ـ ٨ العلاقة بين موصل التأريض وتيار القصر

فترة دوام تيار القصر (ثانية)	مساحة المقطع لكل أمبير من تيار القصر (مم^{٢})		
	موصل به ربط بمسامير	موصل به لحام نحاس	موصل بدون ربط
٠,٥	$٤,٢ \times ١٠^{-٣}$	$٣,٥ \times ١٠^{-٣}$	$٢,٥ \times ١٠^{-٣}$
١	٦×١٠^{-٣}	٥×١٠^{-٣}	$٣,٥ \times ١٠^{-٣}$
٤	١٢×١٠^{-٣}	١٠×١٠^{-٣}	٧×١٠^{-٣}

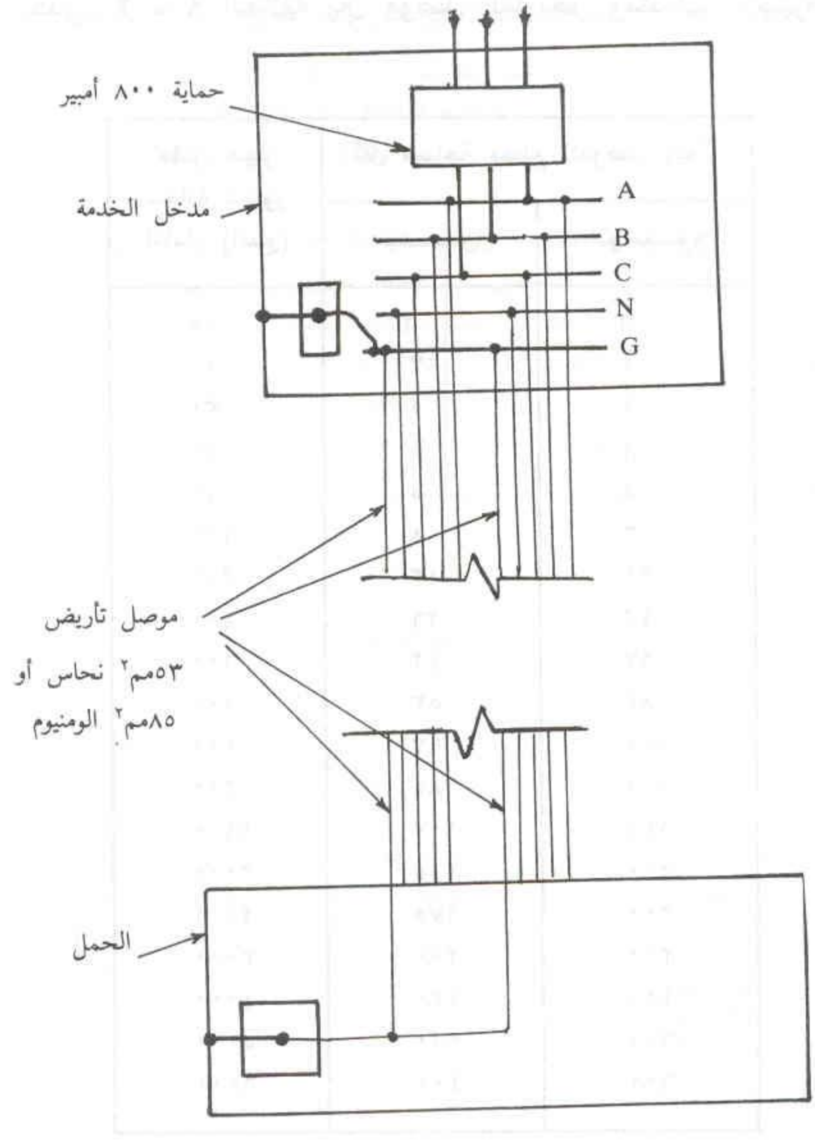

حماية تجاوز تيار
٦٠ أمبير
الحمل
موصل تأريض
٥ مم٢ نحاس
أو ٨ مم٢ ألومنيوم

شكل ٢ - ٣١ موصل تأريض لدائرة واحدة

جدول ٢ - ٩ العلاقة بين موصل التأريض ومقننات الأجهزة*

مقنن جهاز حماية تجاوز التيار (أمبير)	اقل مساحة مقطع للموصل (مم^{٢})	
	نحاس	الومنيوم
١٥	٢	٣
٢٠	٣	٥
٣٠	٥	٨
٤٠	٥	٨
٦٠	٥	٨
١٠٠	٨	١٣
٢٠٠	١٣	٢١
٤٠٠	٢٦	٤٢
٦٠٠	٤٢	٦٧
٨٠٠	٥٣	٨٥
١٠٠٠	٦٧	١٠٧
١٢٠٠	٨٥	١٢٥
١٦٠٠	١٠٧	١٧٥
٢٠٠٠	١٢٥	٢٠٠
٢٥٠٠	١٧٥	٣٠٠
٣٠٠٠	٢٠٠	٣٠٠
٤٠٠٠	٢٥٠	٤٠٠
٥٠٠٠	٣٥٠	٦٠٠
٦٠٠٠	٤٠٠	٦٠٠

* تؤخذ المساحة المتاحة في السوق الأكبر منها مباشرة


حماية ٨٠٠ أمبير
مدخل الخدمة
A
B
C
N
G
موصل تأريض
٥٣مم٢ نحاس أو
٨٥مم٢ الومنيوم
الحمل

شكل ٢ - ٣٢ دائرتين على التوازي بموصلي تأريض

٢ ـ ٥ الربط Bonding

عملية الربط هي عبارة عن إجراءات ضرورية يجب اتخاذها للتأكد من وجود مسار متصل ودائم ذي معاوقة منخفضة لتيار الخطأ الأرضي. يجب إجراء عملية الربط بين التجهزات الآتية للتأكد من أنها كلها على اتصال كهربي واحد يكوِّن منظومة التأريض.

i - أنابيب المياه المستعملة كالكترودات تأريض مع عمل وصلات تخطي على العدادات وأي وصلات وتجهيزات غير معدنية فى الأنابيب.

ii - جميع أنواع الكترودات التأريض المذكورة في البند ٢ ـ ٣.

iii - المنشآت المعدنية المستعملة كموصلات تأريض وجميع موصلات التأريض.

iv - أغلفة الكابلات المعدنية والمجاري المعدنية للكابلات والممرات المعدنية الغير حاملة للتيار.

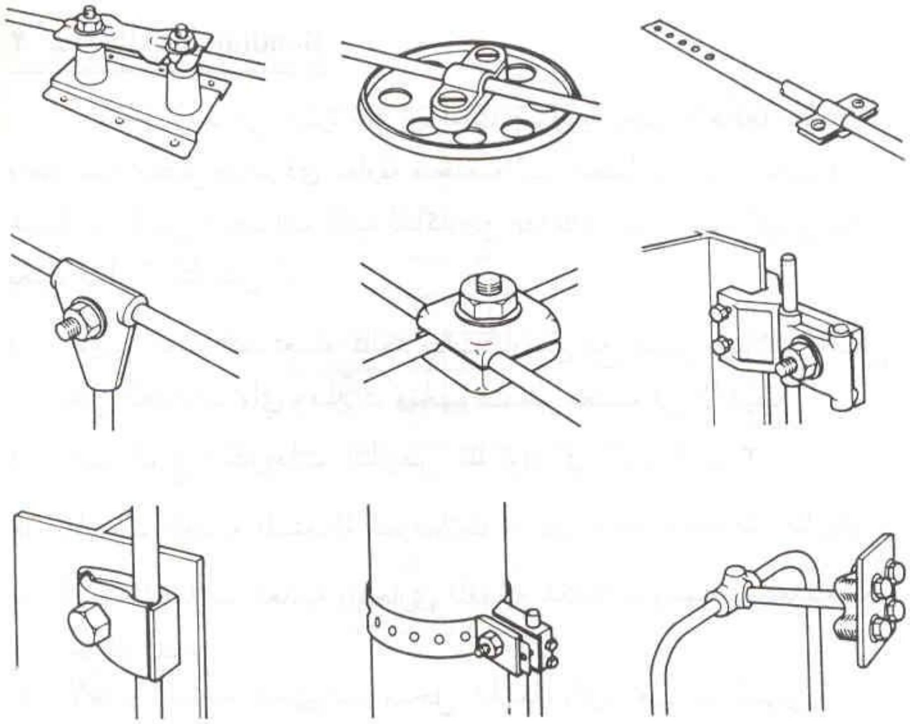
iv - الأغلفة المعدنية لتجهيزات مدخل الخدمة وأي تجهيزات أخرى.

vi - الكابل الرئيسي المغذِّي لمدخل الخدمة.

vii - الهيكل المعدني للمبنى عندما يكون متصلاً اتصالاً تأثيرياً بالأرض.

لا توجد طريقة بذاتها تكون مناسبة لجميع عمليات الربط، وإنما يتم اختيار طريقة الربط حسب كل حالة. أهم الطرق المستخدمة في عمليات الربط هي ما يأتي:

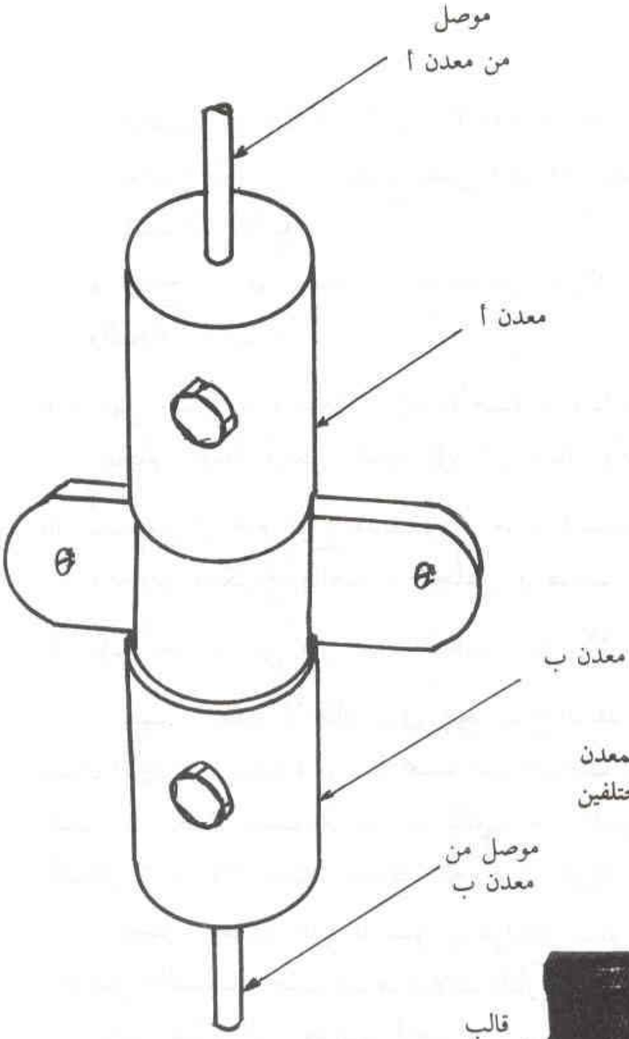
أ ـ التوصيل لميكانيكي، ويتم ذلك عن طريق استخدام قوامط مربوطة بمسامير. ويتم اختيار شكل ونوع هذه القوامط تبعا لحالة الربط، حيث يتم الربط أحياناً بين أنبوبة مياه وبين موصل التأريض، وأحياناً بين الكترود التأريض وموصل التأريض... وهكذا. يبين الشكل ٢ ـ ٣٣ بعضاً من أنواع هذه القوامط. يجب مراعاة النظافة التامة للأسطح قبل عملية الربط، ويراعى كذلك أن تكون القوامط والمسامير من نفس مادة معدن الأجزاء المربوطة. وعند الحاجة لتوصيل موصلين من معدنين مختلفين يجب استخدام وصلة ثنائية المعدن كالمبينة بالشكل ٢ ـ ٣٤.



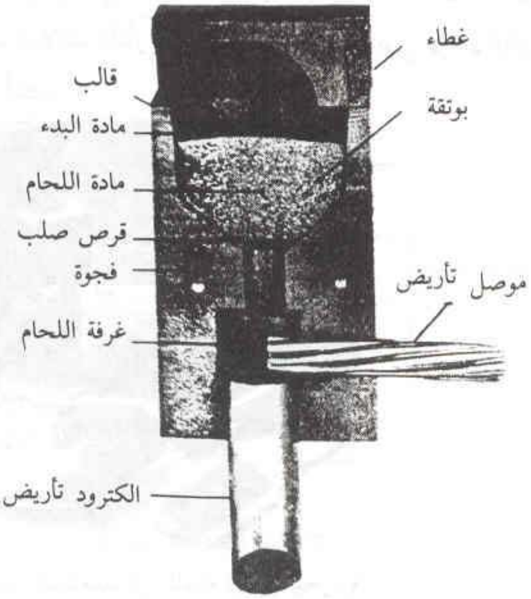
شكل ٢ - ٣٣ بعض أنواع الربط والتوصيل الميكانيكي

ب - التوصيل باستخدام الكبس، ويتم ذلك عن طريق استخدام جلبة خاصة من النحاس أو سبائك النحاس يتم ربطها مع الأجزاء المراد توصيلها وذلك عن طريق استخدام مكبس هيدوليكي خاص.

جـ - التوصيل عن طريق اللحام، ويستخدم في ذلك لحام النحاس أو الفضة، ولا يجوز إستعمال القصدير بأية حال. يوجد الآن نوع حديث من اللحام يعرف باسم exothermic welding أو اللحام الطارد للحرارة يمكن عن طريقه لحام موصل نحاسي بموصل نحاسي أو موصل نحاسي بموصل من الصلب. يستخدم هذا النوع من اللحام الحرارة الناتجة من التفاعل بين مسحوق اكسيد النحاس والألومنيوم مثلاً. يحدث التفاعل داخل قالب من الجرافيت يوجد بداخله المواد المطلوب لحامها في وضع اللحام النهائي. وعند إتمام إنصهار مادة اللحام نتيجة للحرارة الزائدة فإنها تمر من خلال القالب إلى غرفة اللحام حيث تكوِّن رابطة شديدة بين المعدنين المراد


موصل
من معدن أ
معدن أ
معدن ب
موصل من
معدن ب

شكل ٢ - ٣٤ وصلة ثنائية المعدن
لربط موصلين من معدنين مختلفين


غطاء
قالب
بوتقة
مادة البدء
مادة اللحام
قرص صلب
فجوة
موصل تأريض
غرفة اللحام
الكترود تأريض

شكل ٢ ٣٥ طريقة اللحام
الطارد للحرارة

لحامهما. يبين الشكل ٢ ـ ٣٥ هذه الطريقة، كما يبين الشكل ٢ ـ ٣٠ موصَليْ تأريض ملحومين بنفس الطريقة. يتميز هذا النوع من اللحام بالمميزات الآتية:

i - لا يحتاج إلى أي مصدر قدرة خارجي كما في حالة الوصل الهيدروليكي واللحام بالكهربا.

ii - سهل التناول والإستعمال. إن الأجهزة والمعدات المستعملة لهذا النوع من اللحام خفيفة ويمكن حملها إلى أي مكان (أنظر شكل ٢ ـ ٣٦).

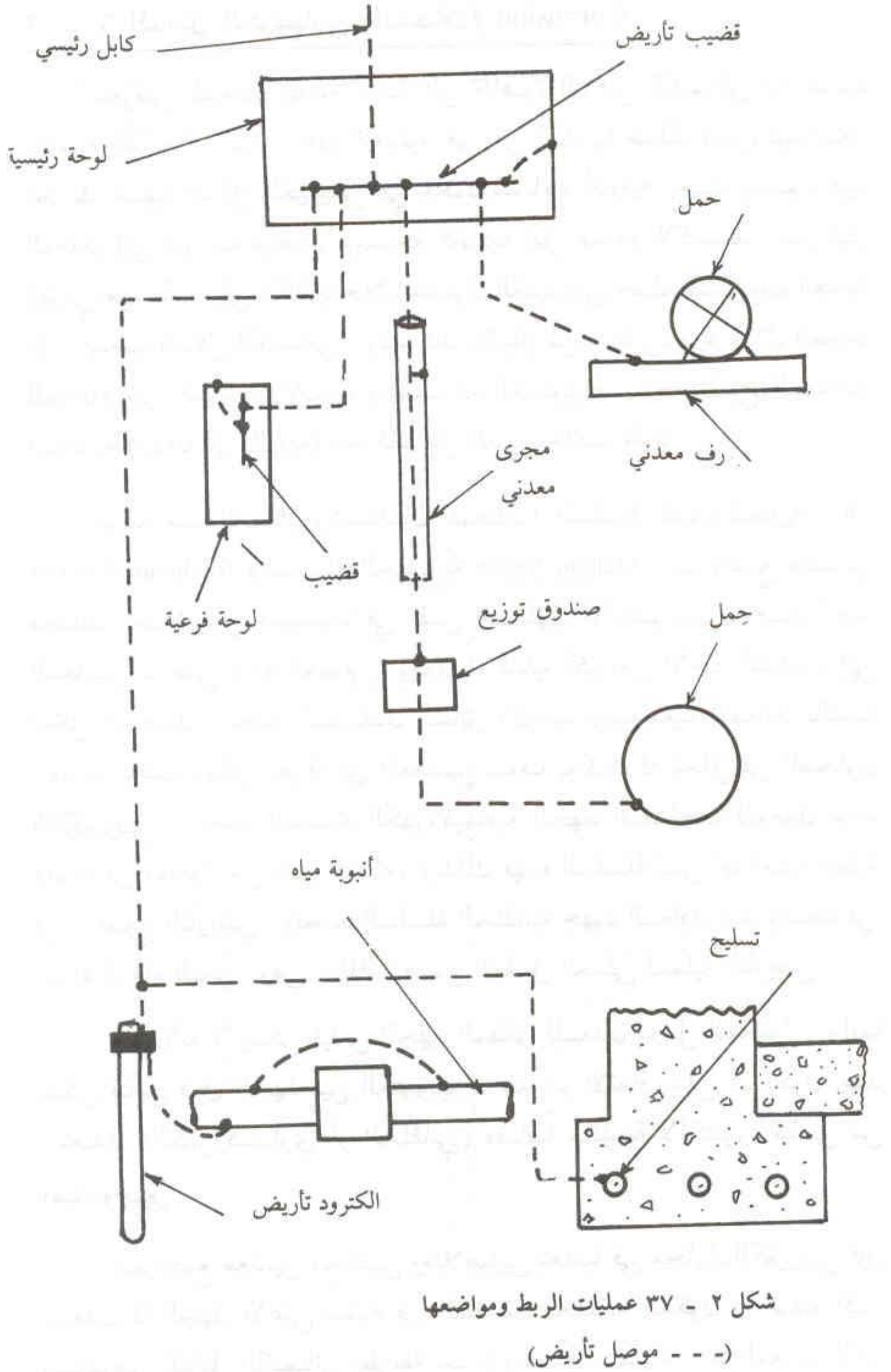
iii - يُستعمل في لحام أنواع عديدة من المعادن كالصلب بجميع أنواعه والنحاس والبرونز والكروم والصلب المجلفن والصلب الملبس بالنحاس.

iv - يؤثر بحرارة أقل من لحام النحاس على الأسطح الملحومة.

يجب ـ بقدر الإمكان ـ في جميع أنواع الربط والتوصيل السابق ذكرها أن تكون الأجزاء المربوطة والموصلة محمية ضد الحوادث والعوامل الجوية والبيئية، كما يجب أن تكون مصممة بحيث يكون من السهل التفتيش عليها. يبين الشكل ٢ ـ ٣٧ شكلاً تخطيطياً لعمليات الربط والتوصيل ومواضعها.

يجب ـ علاوة على ما سبق ـ مراعاة المتانة الميكانيكية لعمليات الربط والوصل والتثبيت، حيث أن موصلات التأريض والربط قد تتعرض لإجهادات ميكانيكية عالية أثناء فترات القصر.

شكل ٢ ـ ٣٦ التجهيزات المستعملة في اللحام الطارد للحرارة



قضيب تأريض
كابل رئيسي
لوحة رئيسية
حمل
رف معدني
مجرى
معدني
قضيب
لوحة فرعية
صندوق توزيع
حِمل
أنبوبة مياه
تسليح
الكترود تأريض

شكل ٢ - ٣٧ عمليات الربط ومواضعها

(- - - موصل تأريض)

٢ - ٦ التآكل الكيميائي (التحات) Corrosion

تتعرض المعادن بصفة عامة الى ظاهرة التآكل الكيميائي إذا كانت ملامسة للتربة أو الماء. هذه العملية هي في أساسها عملية كهروكيميائية. تحدث عملية التآكل الكيميائي في وجود مساحة أنودية حيث يتحول فيها المعدن إلى أيونات موجبة، ومساحة كاثودية تقل عندها الأكاسيد. يمر تيار كهربي من الأنود إلى الكاثود خلال محلول الكتروليتي حيث تؤدي تلك العملية إلى حدوث التآكل الكيميائي. وتتم دائرة التيار عن طريق مروره خلال المعدن الموجود بين المساحة الأنودية والمساحة الكاثودية. يتحدد نوع المساحة المعدنية (أنودية أو كاثودية) تبعا للتفاعل الذي يحدث عليها.

توجد سلسلتان كهروكيميائيتان للمعادن؛ السلسلة الكهروكيماوية Electrochemical Series والسلسلة الجلڤانية Galvnic Series. عند وضع معدنين مختلفين متلامسين معدنياً في نفس المحلول الالكتروليتي، فإن أحد المعدنين - على وجه العموم - يكون له قابليه أكبر من الآخر للذهاب إلى داخل المحلول. تحدد السلسلتان السابق ذكرهما ترتيباً معيناً للمعادن بالنسبة لبعضها بحيث يمكن معرفة أي المعدنين سوف يحدث له تحلل في المحلول الالكتروليتي. تحدد السلسلة الكهروكيماوية الجهد المصاحب للمعدن عند وضعه في محلول من نفس أيوناته، وبذلك فهذه السلسلة ليس لها أهمية عملية في موضوع التأريض. وتحدد السلسلة الجلڤانية جهود المعادن عند وضعها في التربة أو ماء البحر. وهي بذلك تتضمن التطبيق العملي لعملية التأريض.

نظراً لأنه لا يمكن قياس الجهد المطلق للمعدن داخل المحلول، وإنما يمكن قياس فرق الجهد بين الكترودين، فقد تم الإتفاق على أن يكون جهد المعدن (الكهروكيماوي أو الجلڤاني) مقاساً بالنسبة لالكترود قياسي من الهيدروجين.

عند وضع معدنين مختلفين ومتلاصقين معدنيا في محلول الكتروليتي فإن المعدن ذا الجهد الأعلى سلبية في السلسلة الجلڤانية سيكون ذا أنودية أكبر وسيتعرض للتآكل الكيميائي بطريقة أسرع وبمعدل متسارع. أما المعدن الآخر

فإنه يصبح أكثر كاثودية ويقل معدل تآكله. يبين الجدولان ٢ ـ ١٠ و٢ ـ ١١ السلسلة الكهروكيميائية والسلسلة الجلفانية لأهم المعادن ذات الإستخدامات في منظومات القوى بوجه عام ومنظومات التأريض على وجه الخصوص.

تجدر الإشارة هنا إلى أن جهود المعادن الموجودة في جدولي ٢ ـ ١٠ و٢ ـ ١١ لا تدل على معدل التآكل الكيميائي، وإنما تدل فقط على اتجاه التآكل بحيث أن المعدن يعتبر أكثر أنودية من معدن آخر إذا كان يسبقه في الترتيب. فعلى سبيل المثال، إن الصلب يسبق النحاس في الترتيب، وبذلك يحدث التآكل للصلب إذا وضع مع النحاس متلاصقين معدنياً في محلول الكتروليتي.

جدول ٢ ـ ١٠ السلسلة الكهروكيميائية لبعض المعادن

المعدن	الجهد
المغنسيوم	ـ ٢,٣٧
الألومنيوم	ـ ١,٦٦
الزنك	ـ ٠,٧٦
الحديد	ـ ٠,٤٤
القصدير	ـ ٠,١٤
الرصاص	ـ ٠,١٣
الهيدروجين	صفر
النحاس	من ٠,٣٤ إلى ٠,٥٢
الفضة	+ ٠,٨
البلاتين	١,٢
الذهب	من ١,٥ إلى ١,٦٨

جدول ٢ - ١١ السلسلة الجلفانية لبعض المعادن*

المعـــدن	الجهـــد
المغنسيوم النقي التجاري	- ١٧,٥
سبيكة المغنسيوم (٦٪ الومنيوم؛ ٣٪ زنك؛ ١٥٪ منجنيز)	- ١,٦٠
الزنك	- ١,١٠
سبيكة الومنيوم (٥٪ زنك)	- ١,٠٥
الألومنيوم النقي التجاري	- ٠,٨٠
الصلب (النظيف اللامع)	- ٠,٠٥ إلى - ٠,٨
الصلب الصديء	- ٠,٢ إلى - ٠,٥
الحديد الزهر	- ٠,٥
الحديد الصلب في الخرسانة	- ٠,٥
النحاس، النحاس الأصفر، البرونز	- ٠,٢
الحديد الزهر السيليكوني	- ٠,٢
الكربون، الجرافيت، الكوك	+ ٠,٣

* قيم نمطية مقاسة في تربة عادية مع الماء، والجهد مقاس بالنسبة لالكترود مرجع نحاس/كبريتات النحاس.

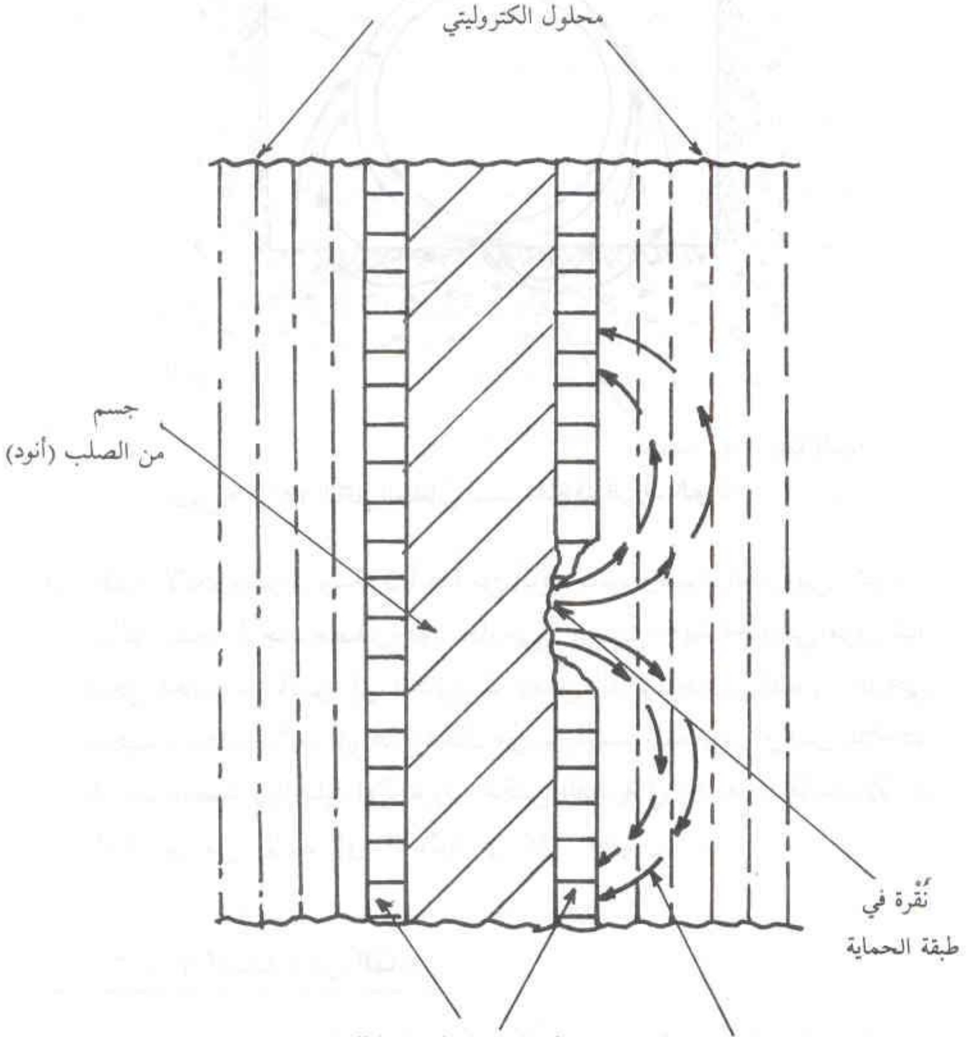
يحدث التآكل الكيميائي إما في وجود خلية Cell جلفانية وإما في وجود خلية الكتروتية.

- الخلية الجلفانية: وتتكون من أنود وكاثود ومحلول الكتروليتي حيث يمر تيار التآكل في هذا التكوين تلقائياً. يكون الأنود ذا جهد سالب بالنسبة للكاثود. لا تتكون الخليـة الجلفانية في حالة وجـود معدنين مختلفين فقط، وإنمـا يمكن أن تتكون بسبب إحدى الحالات الآتية:

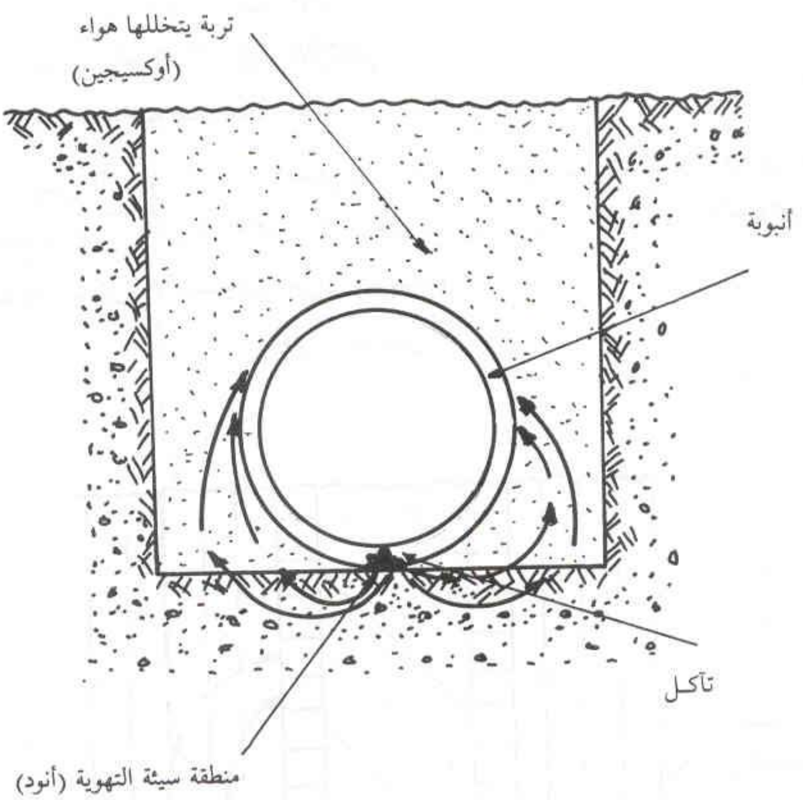
أ - إختلاف حالة السطح.
ب - إختلاف المعالجة الحرارية.
جـ - إختلاف الإجهادات الداخلية في المعدن.

د - إختلاف تركيز الأيونات.
هـ - إختلاف تركيز الأوكسيجين.
و - إختلاف حالة التربة.

يبين الشكل ٢ - ٣٨ حدوث التآكل الجلڤاني بسبب الإختلاف في حالة السطح، ويبين الشكل ٢ - ٣٩ حدوث هذا التآكل بسبب الإختلاف في التهوية (تركيز الأكسيجين حول السطح).


محلول الكتروليتي
جسم من الصلب (أنود)
نُقرة في طبقة الحماية
طبقة معدن خارجية (كاثود)
تيار التآكل

شكل ٢ - ٣٨ التآكل الجلفاني في الجسم بسبب (نُقْرة) في طبقة الحماية السطحية



شكل ٢ - ٣٩ التآكل الجلفاني بسبب اختلاف ظروف التهوية

ii - الخلية الالكتروليتية: وتتكون أيضاً من أنود وكاثود ومحلول الكترويتي. يمر تيار التآكل نتيجة لوجود مصدر جهد خارجي. يسبب الجهد الخارجي مرور تيار داخل الخلية من الأنود إلى الكاثود ثم يكمل الدائرة خلال المصدر الخارجي للجهد. يكون الأنود في هذه الحال موجباً بالنسبة للكاثود. وتجدر الملاحظة هنا أن القطبية في الخلية الالكتروتية عكس القطبية في الخلية الجلڤانية، إلا أن التيار يمر من الأنود إلى الكاثود في كلا الخليتين.

٢ - ٦ - ١ الحماية من التآكل

عند تصميم وتركيب منظومات التأريض، يجب الأخذ في الإعتبار موضوع تآكل المعدن، إما بمراعاة ذلك أثناء اختيار المواد والمعادن الداخلة في

المنظومة وإما بإجراء الإحتياطات اللازمة لتقليل التآكل إلى أصغر قدر ممكن، وإما بالطريقتين معا. يجب بصفة عامة مراعاة ما يأتي:

أ - أن تكون معادن المنشآت والهياكل المعدنية المدفونة هي الأقل أنودية بالنسبة لالكترود التأريض أو موصلات التأريض.

ب - عند توصيل هيكل معدني من معدن أكثر أنوديه من الكترود التأريض (الالكترود من النحاس والهيكل من الصلب المجلفن مثلاً) فيجب أن يكون التوصيل بواسطة شريط من الصلب المجلفن) بحيث يحدث فيه التآكل ويكون من السهل تغييره.

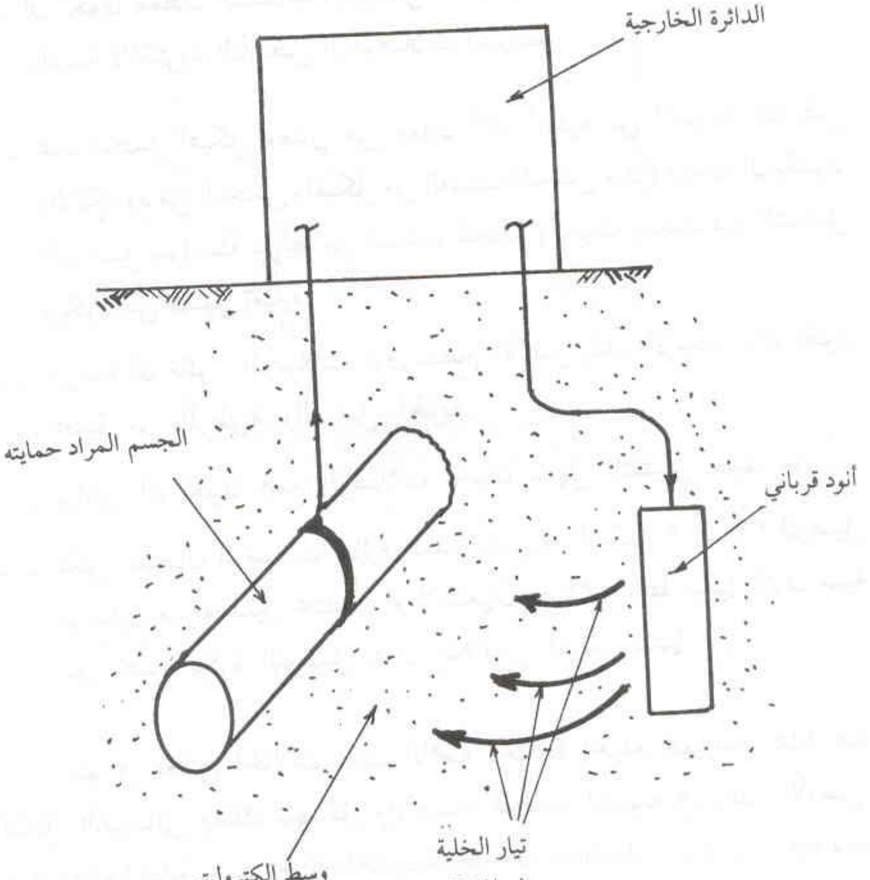
جـ - مراعاة أن تكون الوصلات فوق سطح الأرض بقدر الإمكان وأن تكون محمية من الرطوبة والعوامل الجوية.

د - يراعى أن تكون جميع الوصلات بحيث يسهل التفتيش عليها دورياً.

هـ - يمكن استعمال الوصلات ثنائية المعدن كالمبينة بالشكل ٢ - ٣٤ لتوصيل موصلين من معدنين مختلفين أو لاستعمال وصلات ربط بينهما تكون مبنية على نفس فكرة التوصيل دون التلامس المباشر بينهما.

يتم في بعض الحالات ذات الأهمية الخاصة إجراء تجهيزات حماية ضد التآكل الكيميائي وذلك للهياكل والأجسام المعدنية المدفونة في باطن الأرض. تعرف هذه الحماية باسم الحماية الكاثودية Cathodic protection. هذه الفكرة مبنية على أساس أن التآكل الكيميائي يحدث عادة في الأنود. وعلى هذا الأساس فإنه يتم جعل المنشأ المعدني المراد حمايته أكثر كاثودية من أي وسط محيط به بحيث أنه يلتقط التيار من المحلول الالكتروليتي ولا يخرج منه أي تيار يسبب له التآكل الكيميائي. يتم إكمال المسار المقفل للتيار الداخل للمُنشأ عن طريق دائرة خارجية مع تجهيز أنود خاص في المحلول الالكتروليتي. لعل أبسط الطرق المستعملة في الحماية الكاثودية هي الطريقة المعروفة بنظام الأنود القرباني Sacrificial anode system، حيث يوضع أنود خاص داخل الأرض بالقرب من المعدن المراد حمايته من التآكل بحيث يمر التيار من ذلك الأنود إلى الهيكل المعدني الذي يكون في تلك

الحال بمثابة كاثود في خلية جلفانية تتصل بالدائرة الخارجية لإتمام مسار تيار الخلية. يبين الشكل ٢ - ٤٠ مبدأ عمل هذا النوع من الحماية الكاثودية.


الدائرة الخارجية
الجسم المراد حمايته
أنود قرباني
وسط الكتروليتي
تيار الخلية الجلفانية

شكل ٢ - ٤٠ الحماية الكاثودية باستخدام أنود قرباني

ملحق أ

قصر الدائرة وتحليل الأخطاء
SHORT CIRCUIT AND FAULT ANAL YSIS

أ - ١ مقدمة

تتعرض منظومات القوى الكهربية لأخطاء تنتج أساساً من حدوث قِصَر في الدائرة short circuit في أي نقطة من نقط المنظومة. كما يمكن أن تنتج تللك الأخطاء نتيجة للتشغيل الخاطىء أو لتعرُّض المنظومة لبعض الحالات غير العادية. سوف نهتم في هذا الملحق بأخطاء المنظومة الناتجة عن حدوث قصر في الدائرة.

إن الأنواع الرئيسية من قصر الدائرة هي ما يأتي:

i - خطأ وجه - أرض (خط - أرض) single line to ground fault.
ii - خطأ وجه - وجه (خط - خط) phase to phase fault (line to line).
iii - خطأ وجهين - أرض double phase to ground fault.
iv - خطأ ثلاثة أوجه three phase fault.

قد تحدث تلك الأخطاء السابقة نتيجة للتلامس المباشر أو نتيجة لانهيار العازل الخاص بالموصل الحامل للتيار بالنسبة للأرض أو بين موصلين حاملين للتيار. تؤدي الأخطاء الثلاثة الأولى إلى حدوث عدم اتزان unbalance في الدائرة مما ينتج عنه عدم التماثل في الأداء unsymmetrical operation بين أطوار المنظومة الثلاثة. وعلى خلاف ذلك فإن خطأ الثلاثة أوجه يحافظ على اتزان المنظومة ولا يؤثر على تماثلها.

إن تحليل المنظومة ثلاثية الأطوار في حالة عدم التماثل يحتاج إلى عمليات شاقة ومطوله، ويفضل في مثل تلك الحالات استعمال نظرية المركبات المتماثلة symmetrical components والتي سيأتي شرحها في البند القادم. إتفق المهندسون على فرض عدة فروض مقبولة لتسهيل عمليات حسابات الأخطاء مع عدم التأثير على دقة النتائج بصورة محسوسة. هذه الفروض هي ما يأتي:

أ ـ تولد المولدات قوة دافعة كهربية في دائرة التتابع الموجب فقط positive phase sequence network. ونلاحظ في الحالة الواقعية وجود قدر ضئيل من التوافقيات ومن جهد التتابع السالب.

ب ـ تُهمل المقاومات بصورة عامة. يعطي هذا الفرض قيماً أكبر لتيار القصر ومع هذا فإن الإستفادة من هذا الفرض شائع في عمليات تحليل القصر في منظومات القوى.

جـ ـ تُهمل تيارات أحمال ما قبل لحظة القصر، أي أن المنظومة تُعتبر غير محملة لحظة وقوع القصر.

د ـ ينتج من الفرض السابق أن جميع مصادر الجهد لها نفس مقدار الجهد وزاوية الطور وكذلك جميع نقط المنظومة قبل الخطأ مباشرة.

أ ـ ٢ طريقة المركبات المتماثلة Symmetrical Components

تنص نظرية المركبات المتماثلة على أنه يمكن تحليل أي دائرة ثلاثية الأطوار غير متماثلة إلى ثلاث دوائر متماثلة كل منها دائرة ثلاثية الأطوار. هذه الدوائر الثلاث هي:

أ ـ دائرة التتابع الموجب positive phase sequence network.
ب ـ دائرة التتابع السالب negative phase sequence network.
جـ ـ دائرة التتابع الصفري zero phase sequence network.

إن الفائدة الرئيسية من إستخدام هذه النظرية هي أن الدائرة الأصلية يتم تحليلها إلى ثلاث دوائر متماثلة ومستقلة عن بعضها تماماً حيث تتفاعل كميات

كل دائرة بإستقلال عن الدائرتين الأخريتين. فعلى سبيل المثال نحصل على هبوط جهد التتابع الموجب عن طريق ضرب تيار التتابع الموجب في معاوقة التتابع الموجب فقط، وهكذا لجميع الدوائر.

نفرض منظومة جهد من ثلاثة متجهات (V_a, V_b, V_c). يمكن تحليل تلك المنظومة تبعاً لنظرية المركبات التماثلة إلى مجموع ثلاث منظومات جهد متماثلة كما يأتي:

$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$ .... (أ - ١)

$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2}$ .... (أ - ٢)

$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2}$ .... (أ - ٣)

حيث: V_{c0}, V_{b0}, V_{a0} مركبات جهد منظومة التتابع الصفري.

V_{c1}, V_{b1}, V_{a1} مركبات جهد منظومة التتابع الموجب.

V_{c2}, V_{b2}, V_{a2} مركبات جهد منظومة التتابع السالب.

يوضح الشكل أ - ١ فكرة تطبيق المعادلات (أ - ١) و(أ - ٢) و(أ - ٣)، كما يوضح الشكل أ - ٢ جهود التتابع الثلاثة وعلاقتها ببعضها.

يستخدم المؤثر ($a = 1 \underline{|120^\circ}$) عادة لتبسيط التعامل مع المعادلات السابقة بحيث تكتب تلك المعادلات كما يأتي:

$V_a = V_0 + V_1 + V_2$ .... (أ - ٤)

$V_b = V_0 + a^2V_1 + aV_2$ .... (أ - ٥)

$V_c = V_0 + aV_1 + a^2V_2$ .... (أ - ٦)

مع ملاحظة ما يأتي (راجع الشكل أ - ١)

$a = 1 \quad \underline{|120^\circ}$

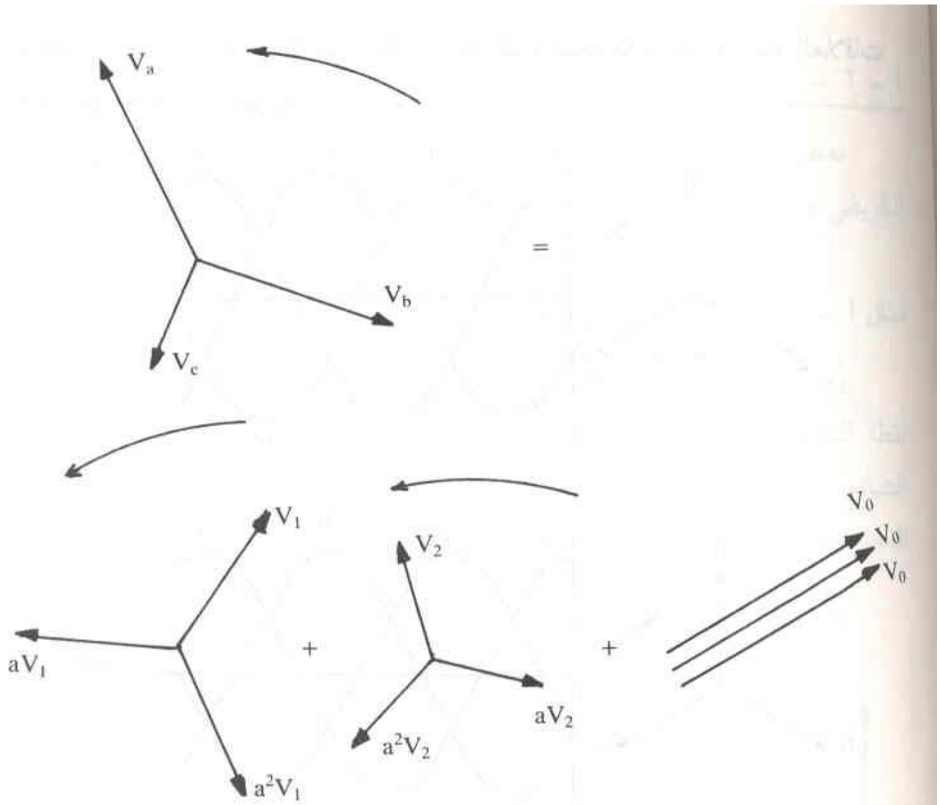
$a^2 = 1 \quad \underline{|240^\circ}$

$a^3 = 1$

$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0}$

$V_{b1} = a^2V_{a1} \quad , \quad V_{c1} = av_{a1}$

$V_{b2} = aV_{a2} \quad , \quad V_{c2} = a^2V_a$



شكل أ - ١ نظرية المركبات المتماثلة

يمكن باستخدام المعادلات (أ - ٤ و(أ - ٥) و(أ - ٦) تعيين قيم المركبات المتماثلة بمعلومية منظومة الجهد الأصلية. بحل تلك المعادلات نحصل على ما يأتي:

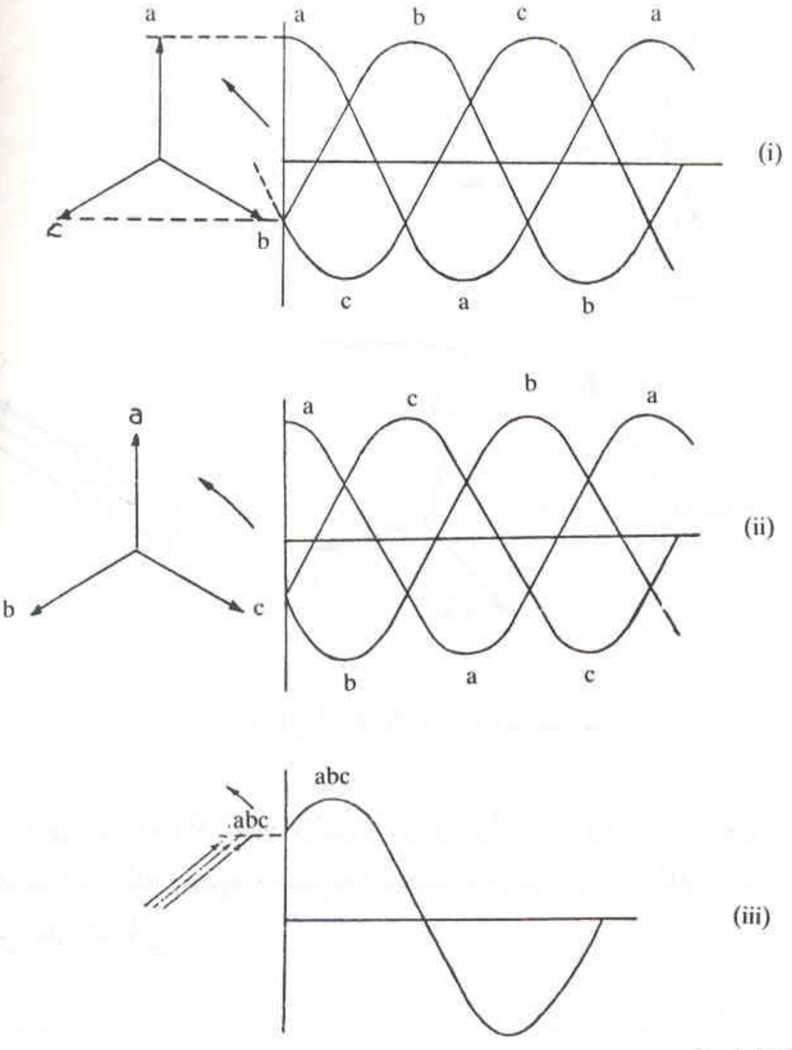
$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \qquad \text{(أ - ٧)}$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \qquad \text{(أ - ٨)}$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \qquad \text{(أ - ٩)}$$

تجدر الإشارة إلى أن نظرية المركبات المتماثلة يمكن تطبيقها على أية

منظومة متجهات ثلاثية الأطوار مثل التيارات والمعاوقات مع مراعاة العلاقات الأساسية للدوائر الكهربية.


a
a
b
c
a
c
b
c
a
b
(i)
a
a
c
b
a
b
c
b
a
c
(ii)
abc
abc
(iii)

(i) التتابع الموجب

(ii) التتابع السالب

(iii) التتابع الصفري

شكل أ - ٢ جهود التتابع

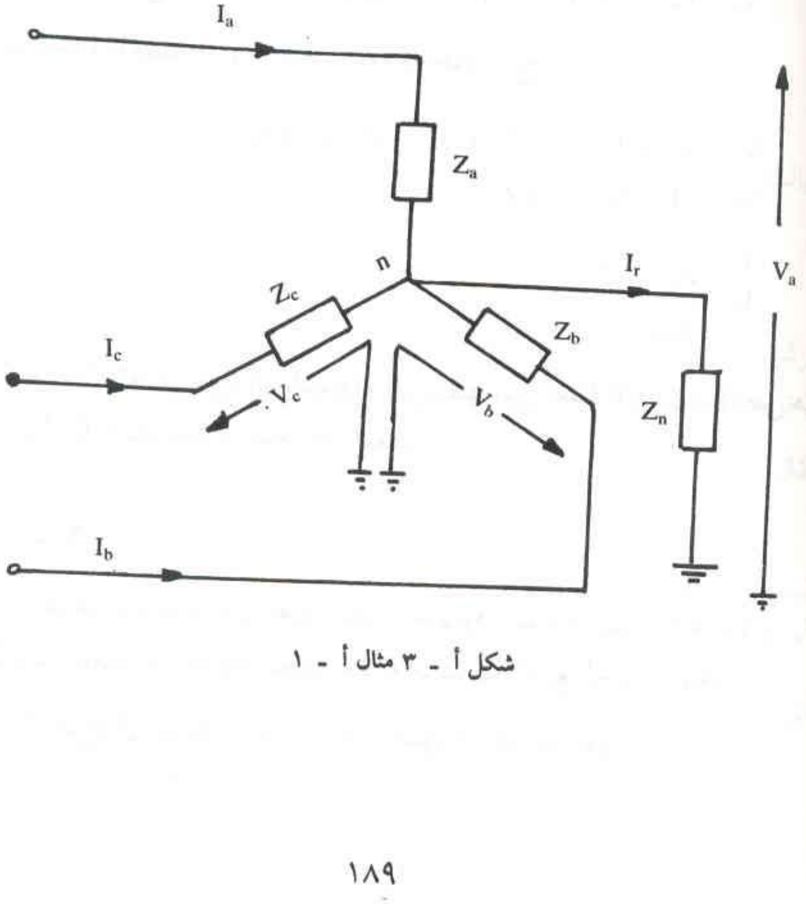
أ - ٢ - ١ تطبيقات

نعطي فيما يلي بعض التطبيقات ذات الأهمية الخاصة في موضوعات التأريض وحسابات الأخطاء وذلك من خلال الأمثلة الآتية :

مثال أ - ١

وُصلت ثلاث معاوقات Z_a و Z_b و Z_c على هيئة نجمة مع معاوقة Z_n بين نقطة التعادل والأرض كما هو مبين بالشكل أ - ٣. المطلوب تعيين معاوقة التتابع الصفري لهذه المنظومة على فرض عدم وجود حث تبادلي بين المعاوقات .

بالرجوع إلى الشكل أ - ٣ يمكن كتابة العلاقات الآتية :



شكل أ - ٣ مثال أ - ١

$$V_a = I_aZ_a + I_rZ_n$$
$$V_b = I_bZ_b + I_rZ_n$$
$$V_c = I_cZ_c + I_rZ_n$$

حيث I_r هو التيار المار من نقطة التعادل n إلى الأرض ويساوي

$$I_r = I_a + I_b + I_c = 3I_0$$

وذلك من المعادلة (أ ـ ٧).

وبفـرض أن مركبـات V_a التتابعيـة هي V_0 و V_1 و V_2 وأن مركبـات I_a التتابعية هي I_0 و I_1 و I_2 ثم التعويض في المعادلات السابقة نحصل على ما يأتي:

$$V_a = I_0Z_a + I_1Z_a + I_2Z_a + 3I_0Z_n$$
$$V_b = I_0Z_b + a^2I_1Z_b + aI_2Z_b + 3I_0Z_n$$
$$V_c = I_0Z_c + aI_1Z_c + a^2I_2Z_c + 3I_0Z_n$$

وبأخذ الحالة العملية $(Z_a = Z_b = Z_c)$ والجمع ينتج

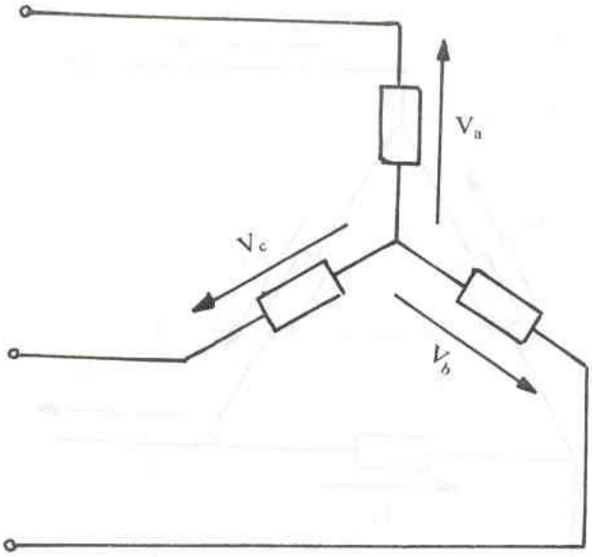
$$V_a + V_b + V_c = I_0 (Z_a + Z_b + Z_c) + 9I_0Z_n$$
$$3V_0 = I_0 \, . \, 3Z_0 + 9I_0Z_n$$
$$\frac{V_0}{I_0} = Z_0 + 3Z_n$$
$$= Z_{00}$$

نستنتج من العلاقة الأخيرة أن المعاوقة التي تظهر بين نقطة التعادل والأرض هي $3Z_n$ أي ثلاثة أمثال مقدار المعاوقة الفعلية.

مثال أ ـ ٢

منـظومة مـوصلة على هيئة نجمـة جهـود الـوجـه لهـا V_a و V_b و V_c والمطلوب التعبير عن جهود الخط بدلالة مركبات التتابع لجهود الوجه.

بالرجوع إلى شكل أ ـ ٤ نوجد جهود الخط كما يأتي:



شكل أ ـ ٤ مثال أ ـ ٢

$$V_{ab} = V_a - V_b$$
$$= (V_0 + V_1 + V_2) - (V_0 + a^2V_1 + aV_2)$$
$$= (1 - a^2)\ V_1 + (1 - a)\ V_2$$

وبالمثل

$$V_{bc} = a^2\ (1 - a^2)\ V_1 + a\ (1 - a)\ V_2$$
$$V_{ca} = a\ (1 - a^2)\ V_1 + a^2\ (1 - a)\ V_2$$

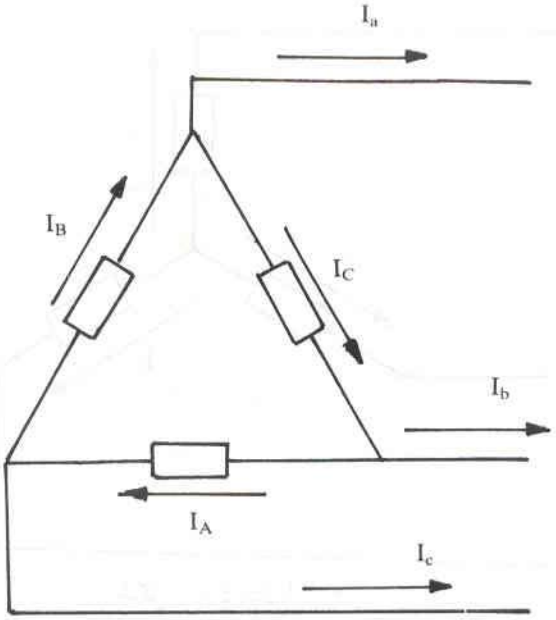
نحصل من العلاقات السابقة على نتيجة هامة وهي أنه بالرغم من وجود مركبة للتتابع الصفري في جهود الوجه (الجهد بين الخط ونقطة التعادل) إلا أنه لا توجد تلك المركبة في جهود الخط (الجهد بين أي خطين).

مثال أ ـ ٣

بين أن مركبة التتابع الصفري لتيارات الخطوط المتصلة بمنظومة دلتا تساوي الصفر.

بالرجوع إلى شكل أ ـ ٥ وتطبيق قانون كيرشوف للتيار نحصل على ما يأتي:

$$I_a = I_B - I_C$$
$$I_b = I_C - I_A$$
$$I_C = I_A - I_B$$



شكل أ ـ ٥ مثال أ ـ ٣

بالجمع ينتج

$$\begin{aligned} I_a + I_b + I_c &= 0 \\ &= 3I_0 \end{aligned}$$

أي أن I_0 لا يتواجد في تيارات الخطوط المتصلة بمنظومة الدلتا.

يتضح مما سبق أن مركبة التتابع الصفري للتيار لا يمكن أن تتواجد في الخطوط إلا أذا وُجد مسار للعودة لها، وهذا لا يمكن تحقيقه في توصيلة الدلتا وإنما يتحقق في توصيلة النجمة عند توصيل نقطة التعادل بمسار عودة إما بخط تعادل أو توصيلها بالأرض. كما يجب ملاحظة إمكانية وجود مركبة صفرية للتيارات المارة داخل توصيلة الدلتا (تيارات الوجه).

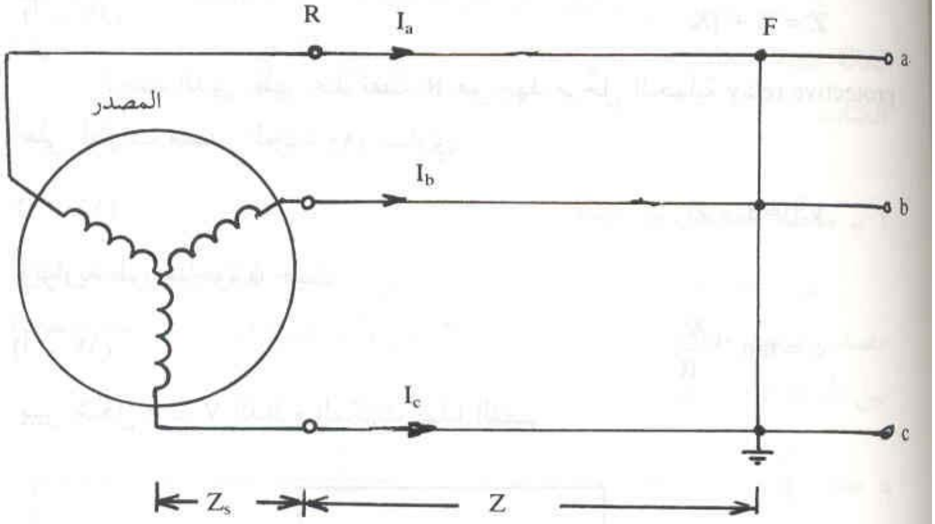
أ ـ ٣ قصر الدائرة في منظومات القوى

سوف ندرس في هذا البند الأنواع المختلفة من قصر الدئرة المذكورة في البند أ ـ ١. وسوف نركز في دراستنا على تأثير القصر على جهد نقطة التعادل والتيار المار في معاوقة التأريض في حالة وجودها.

أ ـ ٣ ـ ١ القصر ثلاثي الأوجه

أ ـ نقطة التعادل غير مؤرضة:

إعتبر مصدراً ثلاثي الأوجه كالمبين بالشكل أ ـ ٦ وافترض قصراً ثلاثي الأوجه مباشر solid قد حدث عند نقطة F كما هو مبين بالشكل. من الواضح أن هذا النوع من القصر لن يؤثر على تماثل الدائرة حيث ستمر تيارات القصر في خطوط الأوجه الثلاثة بطريقة متماثلة بحيث يظل لها نفس المقادير المتساوية وزاوية طور ١٢٠° بين بعضها.



شكل أ ـ ٦ قصر ثلاثي الأوجه ـ نقطة التعادل غير مؤرضة

جهد نقطة الخطأ F يساوي الصفر نظراً لاتصالها بالأرض. Z_s هي معاوقة مصدر الجهد وZ هي المعاوقة المكافئة بين أطراف مصدر الجهد ونقطة الخطأ.

الشروط الحدية boundary conditions للخطأ هي:

$I_a + I_b + I_c = 0$ .... (أ ـ ١٠)

$V_a = V_b = V_c$ .... (أ ـ ١١)

يُحدد مقدار تيار القصر في الوجه a من العلاقة

$$I_a = \frac{E}{Z_s + Z} \qquad \text{(أ - ١٢)}$$

حيث E جهد الوجه للمصدر. يتخلف التيار عن الجهد بزاوية طور ϕ تُعطي بالعلاقة.

$$\tan \phi = \frac{X_s + X}{R_s + R} \qquad \text{(أ - ١٣)}$$

حيث

$$Z_s = R_s + jX_s \qquad \text{(أ - ١٤)}$$

$$Z = R + jX \qquad \text{(أ - ١٥)}$$

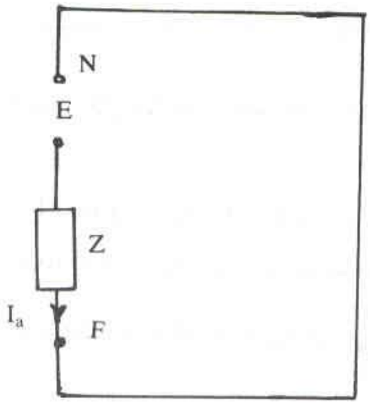
الجهد الذي يظهر عند نقطة R هو جهد مرحِّل الحماية protective relay على أطراف مصدر الجهد وهو يساوي

$$V_a^R = I_a \,.\, Z \qquad \text{(أ - ١٦)}$$

وبزاوية طور متأخرة ψ حيث

$$\psi = \tan^{-1} \frac{X}{R} \qquad \text{(أ - ١٧)}$$

يبين شكل أ - ٧ الدائرة المكافئة لهذا القصر



شكل أ - ٧ الدائرة المكافئة لقصر ثلاثي الأوجه

ب - نقطة التعادل مؤرضة:

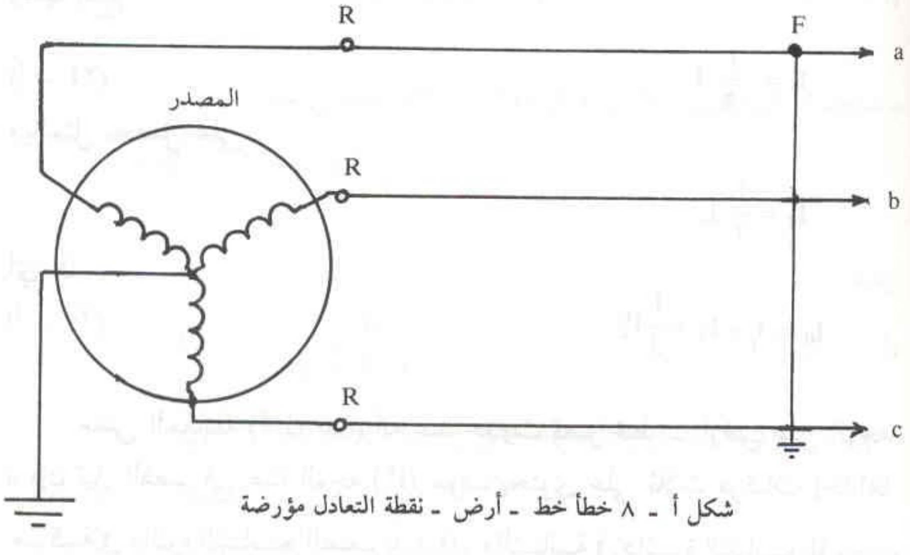
لا يؤثر تأريض نقطة التعادل على طبيعة القصر، حيث ستظل الدائرة محتفظة بتماثلها. ينتج عن ذلك انعدام المركبات الصفرية للتيارات وبالتالي فلا يمر أي تيار بين نقطة التعادل والأرض. ويظل جهد نقطة التعادل مساوياً للصفر حتى في حالة وجود معاوقة تأريض Z_n.

أ - ٣ - ٢ خطأ خط - أرض

إن هذا النوع من الأخطاء هو أكثر الأخطاء شيوعاً وأعظمها أهمية وارتباطاً بحالة نقطة التعادل وطريقة التأريض كما اتضح لنا هذا أثناء دراستنا لهذا الكتاب.

أ - نقطة التعادل مؤرضة:

يبين الشكل أ - ٨ حالة هذا النوع من القصر. نفترض أن نقطة تعادل مصدر الجهد مؤرضة تأريضاً مباشراً بالأرض وأن قصراً قد حدث عند نقطة F بين الوجه a والأرض.



شكل أ - ٨ خطأ خط - أرض - نقطة التعادل مؤرضة

الشروط الحدية للخطأ هي:

$V^F_a = 0$ .... (أ - ١٨)

$I_b = 0$ .... (أ - ١٩)

$I_c = 0$ .... (أ - ٢٠)

نلاحظ أن المعادلتين(أ - ١٩) و (أ - ٢٠) قد وُضعتا على أساس إهمال تيارات ما قبل القصر.

يمكن بإستعمال نظرية المركبات المتماثلة المذكورة في البند أ - ٢ كتابة العلاقات الآتية:

$I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}$ .... (أ - ٢١)

ومنها ينتج

$I_0 = \frac{1}{3} I_a$ .... (أ - ٢٢)

وكذلك

$I_1 = \frac{I_a + aI_b + a^2I_c}{3}$ .... (أ - ٢٣)

ومنها ينتج

$I_1 = \frac{1}{3} I_a$ .... (أ - ٢٤)

وبالمثل نحصل على

$$I_2 = \frac{1}{3} I_a$$

أي أن

$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I^F_a$ .... (أ - ٢٥)

معنى المعادلة (أ - ٢٥) أنه عند حدوث قصر خط - أرض على الوجه a فإن تيار القصر في هذا الوجه (I^F_a) سوف يحتوي على ثلاث مركبات إحداها مركبة في دائرة التتابع الصفري (I_0)، والثانية في دائرة التتابع الموجب

(I_1)، والثالثة في دائرة التتابع السالب (I_2). هذه المركبات الثلاث متساوية وكل منها يساوي ثلث تيار القصر الفعلي في الوجه a.

بالتعبير عن جهد الوجه a عند نقطة الخطأ F (V_a^F) بدلالة مركبات الجهد المتماثلة نحصل على:

(أ - ٢٦) .... $V_a^F = V_0 + V_1 + V_2$

ونظراً لأن تيارات التتابع يتفاعل كل منها مع المعاوقة الخاصة به فقط، كما أن مصدر الجهد يولد قوة دافعة كهربية في التتابع الموجب فقط (وهي خاصية أساسية من خواص المولدات حيث يدور العضو الدوار فيها في اتجاه توليد جهد التتابع الموجب)، فيمكن كتابة ما يأتي:

(أ - ٢٧) .... $V_1 = E - I_1Z_1$

(أ - ٢٨) .... $V_2 = 0 - I_2Z_2 = -I_2Z_2$

(أ - ٢٩) .... $V_0 = 0 - I_0Z_0 = -I_0Z_0$

وبذلك يكون

(أ - ٣٠) .... $V_0 + V_1 + V_2 = E - (Z_0 + Z_1 + Z_2)\, I_1$

باستخدام المعادلتين (أ - ١٨) و(أ - ٣٠) نحصل على:

$$E = (Z_0 + Z_1 + Z_2)\, I_1$$

ومنها

(أ - ٣١) .... $I_1 = I_2 = I_0 = \dfrac{E}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$

وتكون المركبات التتابعية للجهد على الوجه a عند نقطة F هي:

(أ - ٣٢) .... $\left.\begin{aligned} V_2 &= -I_2Z_2 \\ V_0 &= -I_0Z_0 \end{aligned}\right|$

$$V_1 = -(V_2 + V_0)$$
$$V_1 = I_1 (Z_2 + Z_0)$$

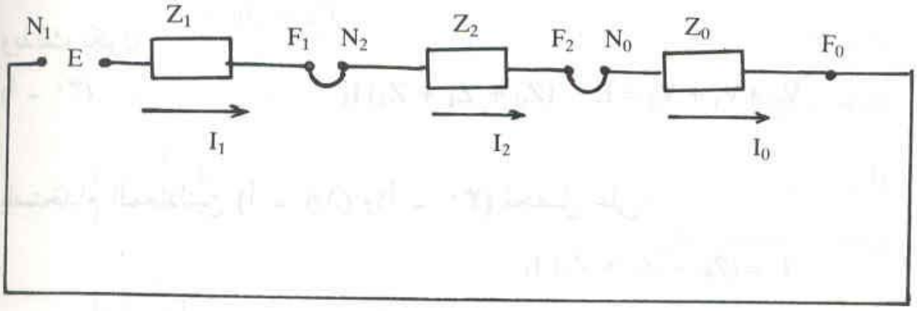
يمكن بعد ذلك إيجاد جهود الأوجه الثلاثة عند نقطة F كما يأتي:

$$V_b^F = V_0 + a^2V_1 + aV_2$$
$$= [a^2 - a) Z_2 + (a^2 - 1) Z_0] I_1 \quad \text{(أ - ٣٣)}$$
$$V_c^F = V_0 + aV_1 + a^2V_2$$
$$= [(a - a^2] Z_2 - (a^2 - 1) Z_0] I_1 \quad \text{(أ - ٣٤)}$$
$$V_a^F = 0 \quad \text{(أ - ٣٥)}$$

والجهد عند نقطة المرحل R هو

$$V_a^R = (Z_0 + Z_1 + Z_2) I_a^F \quad \text{(أ - ٣٦)}$$

يمكن استنتاج الدائرة المكافئة لهذا الخطأ باستخدام المعادلات من (أ - ٢٥) إلى (أ - ٢٩) كما هو موضح بالشكل أ - ٩.



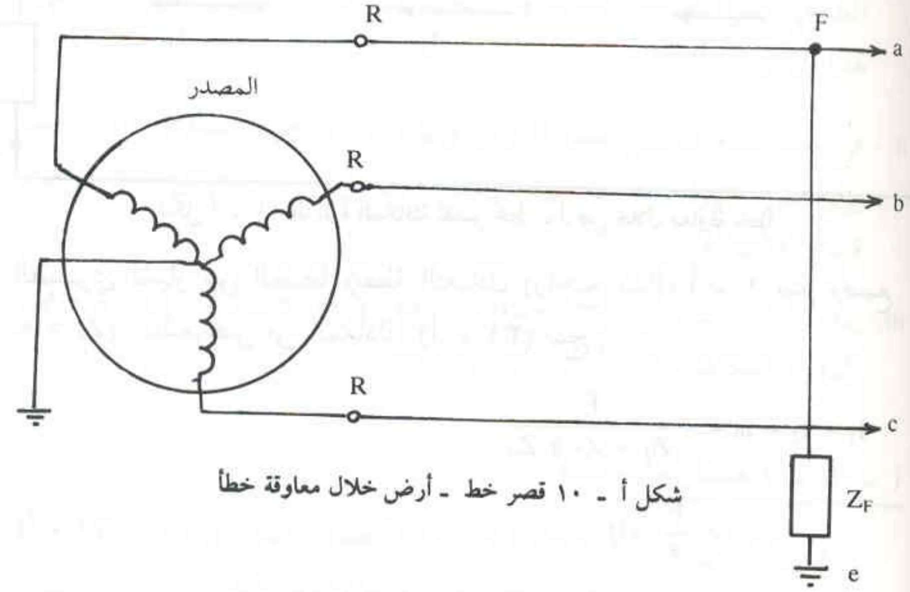
شكل أ - ٩ الدائرة المكافئة لقصر خط - أرض مباشر

نعتبر الآن نفس نوع القصر السابق إلا أن القصر على الوجه a قد حدث خلال معاوقة خطأ Z_F كما هو موضح بالشكل أ - ١٠.

يمكننا كتابة العلاقات الآتية:

$$V_a^F = Z_F I_a^F \quad \text{(أ - ٣٧)}$$
$$V_a^F = V_0 + V_1 + V_2 \quad \text{(أ - ٣٨)}$$

$$V_a^F = Z_F(I_0 + I_1 + I_2) \quad \text{.......... (أ - ٣٩)}$$



شكل أ - ١٠ قصر خط - أرض خلال معاوقة خطأ

ومنها

$$V_0 + V_1 + V_2 = Z_F(I_0 + I_1 + I_2) \quad \text{.......... (أ - ٤٠)}$$

وبالتعويض بالمعادلات (أ - ٢٧) و (أ - ٢٨) و (أ - ٢٩) في المعادلة (أ - ٤٠) ينتج :

$$(E - I_1Z_1 - I_1Z_F) + (-I_2Z_2 - I_2Z_F) + (-I_0Z_0 - I_0Z_F) = 0$$

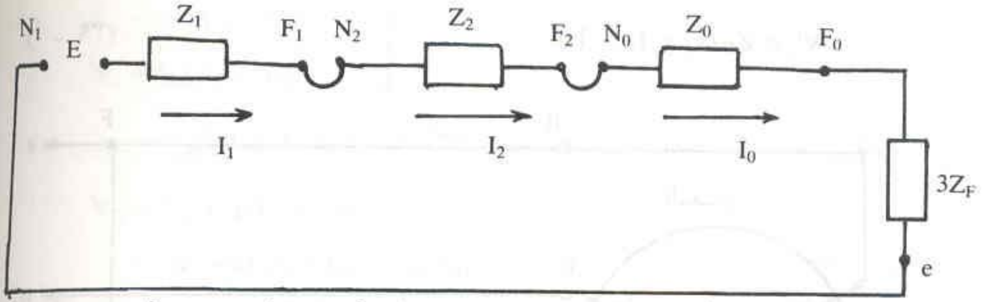
وبما أن $I_0 = I_2 = I_1$ فإننا نحصل على ما يأتي :

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_F} \quad \text{.......... (أ - ٤١)}$$

ويمكن بذلك تعديل الدائرة المكافئة كما هو مبين بالشكل (أ - ١١).

ب - نقطة التعادل غير مؤرضة :

في حالة عدم تأريض نقطة التعادل وبإهمال سعة الخط مع الأرض فإن معاوقة التتابع الصفري تصبح لانهائية نظراً لعدم وجود مسار لمركبة التتابع



شكل أ - ١١ الدائرة المكافئة لقصر خط - أرض خلال معاوقة خطأ

الصفـري للتيار بين الخـطأ ونقطة التعـادل (راجـع مثـال أ - ١ مـع وضـع $Z_n = \infty$). بالتعويض في المعادلة (أ - ٣١) ينتج :

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$= \frac{E}{\infty} = 0 \qquad \text{(أ - ٤٢)}$$

وبـالتعـويض في المعـادلات (أ - ٢٧) و (أ - ٢٨) و (أ - ٢٩) نحصـل على :

$$V_1 = E - I_1 Z_1 = E \qquad \text{(أ - ٤٣)}$$

$$V_2 = -I_2 Z_2 = 0 \qquad \text{(أ - ٤٤)}$$

$$V_0 = -(V_1 + V_2)$$

$$= -E \qquad \text{(أ - ٤٥)}$$

أي أن المركة الصفرية للجهد عند نقطة الخطأ هي ($-E$). ولكن نظراً لعدم إمكانية وجود مركبة صفرية للتيار بين نقطة الخطأ ونقطة التعـادل فإن نقـطة التعادل يجب أن تكون على جهد V_n حيث

$$V_n = -E \qquad \text{(أ - ٤٦)}$$

من دراستنا السابقة لقصر خط - أرض يمكن الوصول إلى الإستنتاجات التالية :

i - في حالة تأريض نقطة التعادل فإن الجهد على الوجهين السليمين يـرتفع

قليلاً فوق الجهد الطبيعي (المعادلتين أ - ٣٣ وأ - ٣٤). أما الجهد عند نقطة R (نقطة المرحل) على الوجه الخاطىء فإنه يقل كثيراً عن المعدل الطبيعي نظراً للهبوط الشديد في الجهد الناشىء من تيار القصر المار في هذا الوجه.

ii - في حالة عدم تأريض نقطة التعادل فإنها تكتسب جهداً يساوي (E –) مما يؤثر على جهود نقط المنظومة كلها بحيث ترتفع إلى حوالي ١٧٠٪ من قيمتها الأصلية.

iii - إذا حدث القصر من خلال معاوقة Z_F مع الأرض فإن ذلك يتم تمثيله في الدائرة المكافئة بثلاثة أمثال تلك المعاوقة.

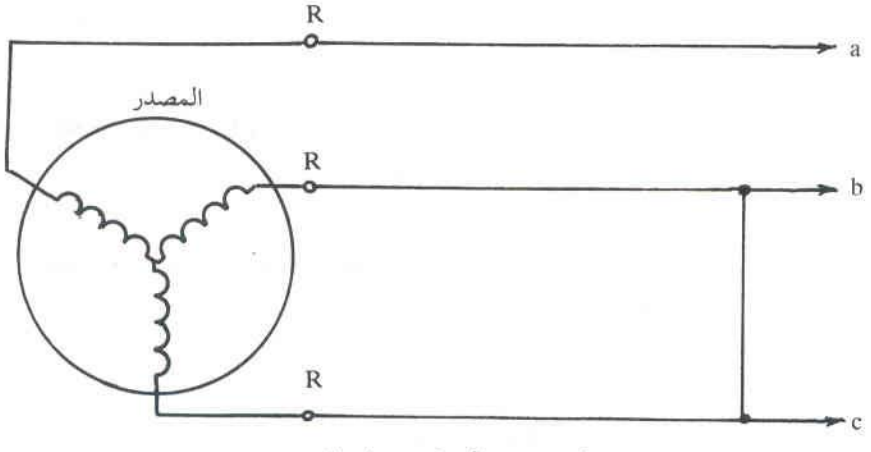
أ - ٣ - ٣ خطأ خط - خط

يبين الشكل (أ - ١٢) هذا النوع من الأخطاء، حيث يحدث قصر مباشر بين الوجهين c, b. يتحقق هذا القصر بالشروط الثلاثة الآتية:

(أ - ٤٧) .... $I_a^F = 0$

(أ - ٤٨) .... $I_b^F = -I_c^F$

(أ - ٤٩) .... $V_b^F = V_c^F$



شكل أ - ١٢ خطأ خط - خط مباشر

باستخدام نظرية المركبات المتماثلة نحصل من المعادلات السابقة على ما يأتي:

$$I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}$$

$$\frac{0 + I_b + (-I_b)}{3} =$$

$I_0 = 0$ .... (أ ـ ٥٠)

$$I_1 = \frac{I_a + aI_b + a^2I_c}{3}$$

$$= \frac{1}{3}(a - a^2)\, I_b$$

$I_1 = \dfrac{jI_b}{\sqrt{3}}$ .... (أ ـ ٥١)

وبالمثل نحصل على

$$I_2 = \frac{1}{3}(a^2 - a)\, I_b$$

$= -\dfrac{jI_b}{\sqrt{3}}$ .... (أ ـ ٥٢)

أي أن

$I_2 = -I_1$ .... (أ ـ ٥٣)

ومن المعادلة (أ ـ ٤٩)

$$V_0 + a^2V_1 + aV_2 = V_0 + aV_1 + a^2V_2$$

ثم باستخدام المعادلات (أ ـ ٢٧) و (أ ـ ٢٨) و(أ ـ ٢٩) نحصل على:

$$a^2(E - I_1Z_1) - aI_2Z_2 = a(E - I_1Z_1) - a^2I_2Z_2$$

أي أن

$$E(a^2 - a) = I_1(Z_1 + Z_2)(a^2 - a)$$

ومنها

(أ - ٥٤) $$I_1 = \frac{E}{Z_1 + Z_2}$$

وباستخدام المعادلتين (أ - ٤٨) و (أ - ٥٢) نحصل على:

(أ - ٥٥) $$I_b = -j\sqrt{3}\,I_1$$

(أ - ٥٦) $$I_c = j\sqrt{3}\,I_1$$

أما بالنسبة لجهود الوجه فإن

(أ - ٥٧) $$V_0 = -I_0 Z_0 = 0$$

$$V_1 = \frac{V_a + aV_b + a^2V_c}{3}$$

$$= \frac{V_a + (a + a^2)\,V_b}{3}$$

(أ - ٥٨) $$= \frac{V_a - V_b}{3}$$

وبالمثل نحصل على

(أ - ٥٩) $$V_2 = \frac{V_a - V_b}{3}$$

أي أن

(أ - ٦٠) $$V_1 = V_2$$

وبما أن $(I_a = 0)$ فإن

$$V_a = E = V_1 + V_2 + V_0$$

(أ - ٦١) $$V_a = E = V_1 + V_2 = 2V_1$$

$$V_b^F = V_0 + a^2V_1 + aV_2$$

(أ - ٦٢) $$V_b^F = -V_1$$

وبالمثل

(أ - ٦٣) $V_c^F = -V_1$

أي أن

(أ - ٦٤) $V_b^F = V_c^F = -V_1 = -\frac{E}{2}$

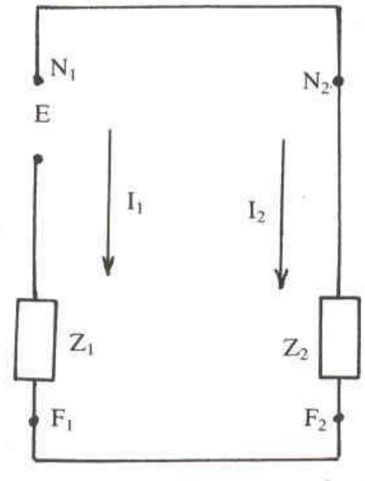
ويمكن بعد ذلك حساب الجهود عند المرحل (نقطة R) كما يأتي:

(أ - ٦٥) $V_a^R == E$

(أ - ٦٦) $V_b^R = V_b^F + I_{1b}Z_1 + I_{2b}Z_2$

(أ - ٦٧) $V_c^R = V_c^F + I_{1c}Z_1 + I_{2c}Z_2$

يمكن بذلك استنتاج الدائرة المكافئة لهذا القصر من المعادلات (أ - ٥٣) و (أ - ٥٤) و(أ - ٦٠) كما هو مبين بالشكل أ - ١٣.

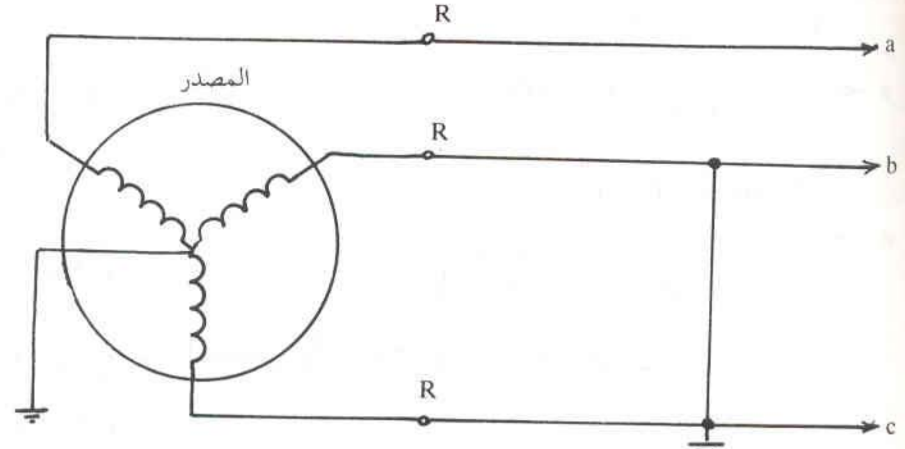


شكل أ - ١٣ الدائرة المكافئة لقصر خط - خط

لا يتأثر هذا النوع من القصر بطريقة تأريض نقطة التعادل نظرا لانعدام مركبة التتابع الصفري للتيار. وعلى ذلك فإن جميع المعادلات المستنتجة لقصر خط - خط تسري في حالة نقطة التعادل المعزولة والمؤرضة.

أ - ٣ - ٤ خطأ خطين - أرض

نفترض في هذا الخطأ حدوث قصر بين الوجهين c, b مع الأرض كما هو مبين بالشكل أ - ١٤ . الشروط الحدية لحدوث هذا الخطأ على فرض تأريض نقطة التعادل هي ما يأتي :



شكل أ - ١٤ قصر خطين - أرض. نقطة التعادل مؤرضة

(أ - ٦٨) .... $I_a^F = 0$

(أ - ٦٩) .... $V_b^F = 0$

(أ - ٧٠) .... $V_c^F = 0$

بالتعويض بالمركبات المتماثلة في المعادلات الثلاث السابقة نحصل على ما يأتي :

(أ - ٧١) .... $I_0 + I_1 + I_2 = 0$

(أ - ٧٢) .... $V_b = (-I_0Z_0) + a^2(E - I_1Z_1) + a(-I_2Z_2) = 0$

(أ - ٧٣) .... $V_c = (-I_0Z_0) + a(E - I_1Z_1) + a^2(-I_2Z_2) = 0$

وبحل تلك المعادلات معاً نحصل على :

(أ - ٧٤) .... $$I_1 = \frac{E}{Z_1 + \frac{Z_2Z_0}{Z_2 + Z_0}}$$

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \qquad \text{(أ - ٧٥)}$$

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} \qquad \text{(أ - ٧٦)}$$

يمكن بعد ذلك تعيين تياري القصر في الوجهين c, b كما يأتي :

$$I_b^F = a^2 I_1 + a I_2 + I_0$$

$$= I_1 \left(a^2 - \frac{Z_2 + aZ_0}{Z_2 + Z_0} \right) \qquad \text{(أ - ٧٧)}$$

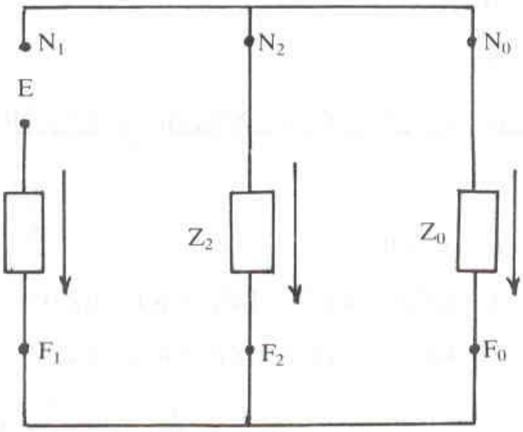
$$I_c^F = a I_1 + a^2 I_2 + I_0$$

$$= I_1 \left(a - \frac{Z_2 + a^2 Z_0}{Z_2 + Z_0} \right) \qquad \text{(أ - ٧٨)}$$

وبالرجوع إلى المعادلتين (أ - ٦٩) و(أ - ٧٠) نجد أن :

$$V_1 = V_2 = V_0 \qquad \text{(أ - ٧٩)}$$

والجهود على المرحل عند نقطة R هي :



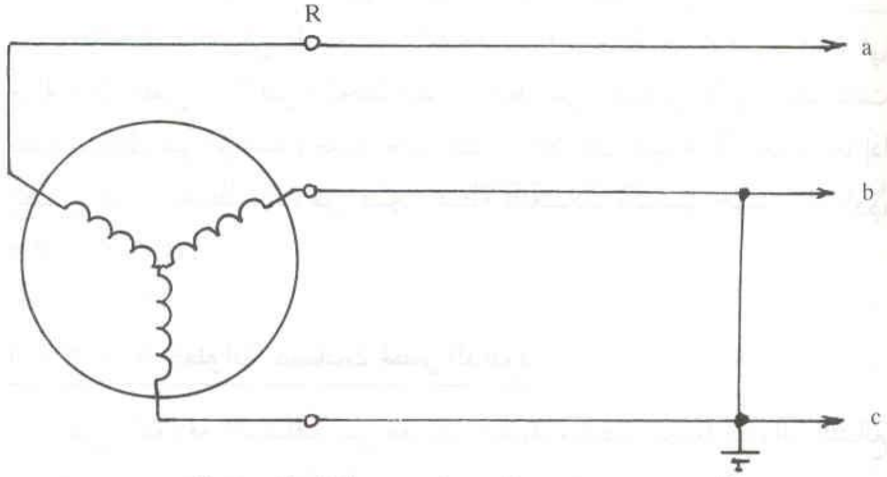
شكل أ - ١٥ الدائرة المكافئة لقصر خطين - أرض مباشر. نقطة التعادل مؤرضة

$$V_a^R = E \quad \text{(أ - ٨٠)}$$

$$V_b^R = I_0Z_0 + a^2I_1Z_1 + aI_2Z_2 \quad \text{(أ - ٨١)}$$

$$V_c^R = I_0Z_0 + aI_1Z_1 + a^2I_2Z_2 \quad \text{(أ - ٨٢)}$$

يبين الشكل أ - ١٦ حالة قصر خطين - أرض مباشـر في حالـة عدم تأريض نقطة التعادل.



شكل أ - ١٦ قصر خطين - أرض مباشر - نقطة التعادل معزولة

لا يوجد في تلك الحال أي مسار مقفل للمركبة الصفرية للتيار، أي أن $I_0 = 0$. ينتج من المعادلة (أ - ٧١) أن:

$$I_1^F = -I_2^F \quad \text{(أ - ٨٣)}$$

وباستعمال المعادلتين (أ - ٢٧) و (أ - ٢٨) مع المعادلة (أ - ٨٣) ينتج

$$I_1^F = -I_2^F = \frac{E}{Z_1 + Z_2} \quad \text{(أ - ٨٤)}$$

كما أن

$$V_a = E = V_1 + V_2 + V_0 \quad \text{(أ - ٨٥)}$$

ومنها نجد أن

$$V_1^F == V_2^F = V_0^F = \frac{E}{3} \quad \text{(أ - ٨٦)}$$

$$V_2^F = -I_2Z_2 = \frac{EZ_2}{Z_1 + Z_2} = V_0^F \qquad \text{(أ - ٨٧)}$$

ولكي لا تمر مركبة التيار الصفري في الوجهين c, b وبالتالي الوجه a يجب أن يكون جهد نقطة التعادل مساويا V_0. أي أن نقطة التعادل تكتسب جهدا مقداره

$$V_n = \frac{EZ_2}{Z_1 + Z_2} \qquad \text{(أ - ٨٨)}$$

نلاحظ أنه يمكن الربط بين النتيجة الموضحة بالمعادلة (أ - ٨٨) في حالة خطأ خطين - أرض والخطأ خط - خط على الأساس الآتي: «إذا كانت نقطة التعادل غير مؤرضة وحدث خطأ خط - خط فإن جهدها لا يتغير، أما إذا إتصل هذا الخطأ بالأرض فإن نقطة التعادل تكتسب جهداً يساوي $(EZ_2/Z_1 + Z_2)$».

أ - ٣ - ٥ خطوات حسابات قصر الدائرة

i - عين المعاوقة المكافئة بين مصدر الجهد ونقطة الخطأ لدوائر التتابع الصفري والموجب والسالب.

ii - باستخدام دوائر التتابع كوِّن الدائرة المكافئة تبعا لنوع الخطأ.

iii - عين مركبات التيار التتابعية خلال دوائر التتابع الثلاث.

iv - إحسب التيارات الحقيقية (تيارات الأوجه) بمعرفة تيارات التتابع الثلاثة.

v - عين الجهود التتابعية خلال دوائر التتابع.

vi - يمكن بعد ذلك تعيين الجهود والتيارات الحقيقية عند أي نقطة من الدائرة.

vii - إذا حدث خطأ خط - خط خلال معاوقة Z_F توضع تلك المعاوقة على التوالي في الدائرة المكافئة مع Z_1, Z_2 بحيث يصبح

$$I_1^F = -I_2^F = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \qquad \text{(أ - ٨٩)}$$

ملحق ب

الحسابات الخاصة بتأريض المنظومة

ب - ١ مقاومة الكترود نصف كروي

لا يُستعمل الالكترود نصف الكروي عادة كالكترود تأريض، إلا أنه أبسط الألكترودات من حيث عملية التحليل والدراسة النظرية وذلك بسبب تماثله الهندسي. بالإشارة إلي شكل ب - ١، يمكن اعتبار أن تيار القصر الأرضي I يخرج من سطح الالكترود عمودياً على هذا السطح ثم يستمر في هذا الإتجاه الاشعاعي. وعلى ذلك فإن المقاومة الأرضية للتيار تظهر على شكل قشرات متتابعة نصف كروية كما هو مبين بالشكل ب - ١. مقاومة قشرة كروية على بعد x من مركز الالكترود وسمكها dx هي dR حيث:

$$dR = \rho\, dx/2\pi x^2$$

حيث: ρ مقاومية التربة (أوم. متر).

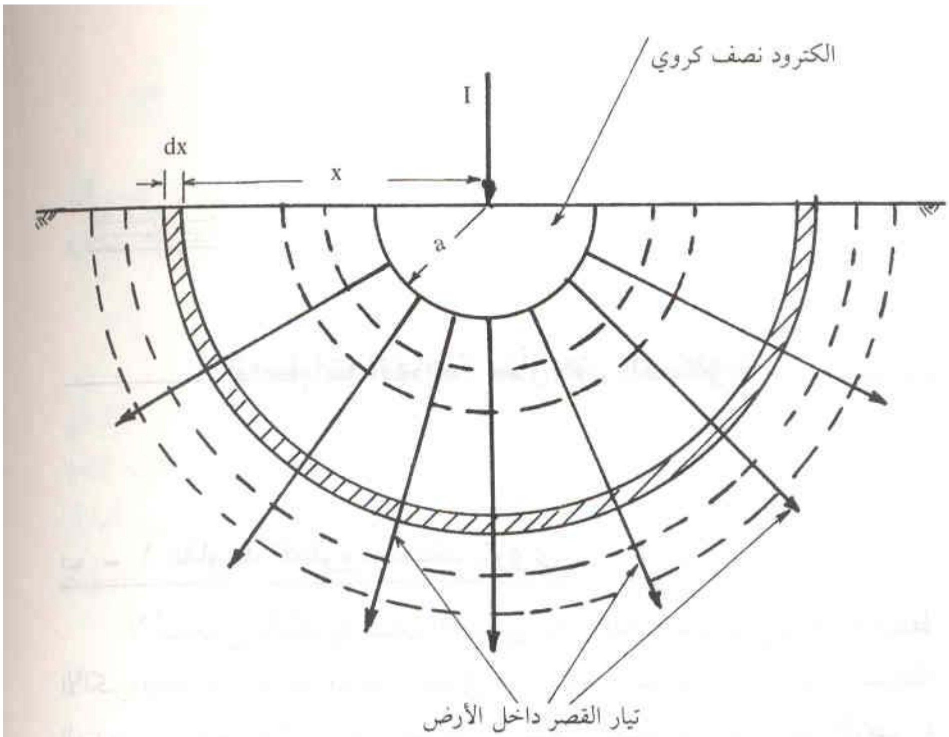
$(2\pi x^2)$ مساحة المقطع العمودي على مسار التيار.

dx طول مسار التيار في القشرة الكروية.

يمكن بذلك إيجاد المقاومة بين سطح الالكترود $(x = a)$ وأي مسافة rمقاسة من مركز الالكترود كما يأتي:

$$R = \int_a^r \rho\, dx/2\pi x^2$$

$$= \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r}\right) \quad \text{Ohm} \ldots\ldots\ldots\ldots (ب - ١)$$



شكل ب - ١ مقاومة الكترود نصف كروي

ونحصل على المقاومة الكلية للالكترود بوضع ($r = \infty$) في المعادلة (ب - ١) فينتج :

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi a} \qquad \text{Ohm} \; \dots\dots\dots \; (\text{ب} - ٢)$$

حيث R_G المقاومة المطلقة للالكترود. نلاحظ من المعادلتين (ب - ١) و(ب - ٢) أنه عند $r = 10a$ فإن المقاومة تصبح ٩٠٪ من المقاومة المطلقة للالكترود، وهذا يفسر سبب تركيز المقاومة الأرضية في حيز محدود حول الالكترود يعرف بأسم منطقة المقاومة كما سبق ذكره في البند ٢ - ٢.

باعتبار أن جهد الأرض في اللانهاية يساوي الصفر، وبتطبيق قانون أوم يمكن إيجاد فرق الجهد بين سطح الالكترود وبين أي نقطة على بعد مسافة r من مركزه كما يأتي :

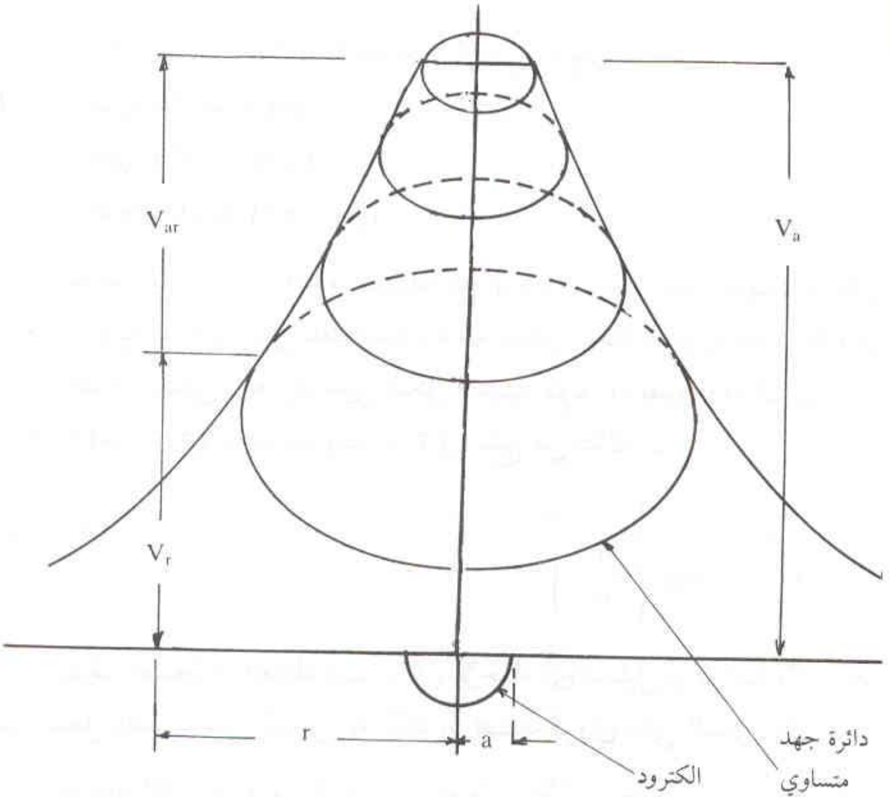
$$V_{ar} = IR$$

$$V_{ar} = I.\frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r}\right) \quad \text{Volt} \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(ب - ٣)}$$

والجهد المطلق للالكترود هو (عند وضع r مساوية للانهاية).

$$V_a = I.\frac{\rho}{2\pi a} \quad \text{Volt} \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(ب - ٤)}$$

يبين الشكل ب ـ ٢ إنحدار الجهد في المنطقة حول الالكترود حيث يكون جهد سطح الأرض الملامس للالكترود مساوياً $I.\frac{\rho}{2\pi a}$، وجهد سطح الأرض المطلق عند أي مسافة r هو $I\frac{\rho}{2\pi r}$. ونلاحظ أن فرق الجهد بين سطح الالكترود وبين نقطة على بعد r من مركزه يُحَدد من المعادلة (ب ـ ٣).



شكل ب ـ ٢ منطقة انحدار الجهد لالكترود نصف كروي

ب ـ ٢ مقاومة الكترود على شكل قضيب

من الصعب حساب مقاومة الالكترود إذا كان على شكل قضيب اسطواني رغم وجود عدة نماذج رياضية لإيجاد تلك المقاومة بدرجة كافية من الدقة. وعلى أية حال فإن أكثر العلاقات استعمالاً هي ما يأتي:

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L} \log_e \frac{3L}{d}$$ .... (ب - ٥)

أو:

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L} \log_e \frac{4L}{d}$$ .... (ب - ٦)

أو:

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\log_e \frac{8L}{d} - 1\right)$$ .... (ب - ٧)

حيث: R_G : المقاومة الكلية لالكترود التأريض (أوم).
L : طول الالكترود (متر).
d : قطر الالكترود (متر).
ρ : مقاومية التربة (أوم. متر)

نعتبر الآن إحدى هذه المعادلات لإجراء الدراسة عليها، ولتكن المعادلة (ب ـ ٥). تبين تلك المعادلة أنه يمكن إيجاد الكترود نصف كروي نصف قطره a يكافيء الكترود على شكل قضيب طوله L وقطره d وذلك بمساواة المعادلة (ب ـ ٥) بالمعادلة (ب ـ ٢). ينتج من ذلك أن:

$$a = \frac{L}{\log_e \left(\frac{3L}{d}\right)}$$ .... (ب - ٨)

يمكن استخدام العادلة (ب ـ ٨) لإجراء أي تحليل أو دراسة لالكترود على شكل قضيب على أساس أنه الكترود نصف كروي على النحو التالي:

مقاومة الكترود نصف كروي إبتداء من سطحه وحتى بعد r من مركزه

هي: $R = \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r}\right)$. هذه المقاومة هي نسبة من المقاومة المطلقة للالكترود R_G، حيث:

$$\frac{R}{R_G} = 1 - \frac{a}{r}$$

وباستخدام المعادلة (ب ـ ٨) نحصل على النسبة التالية في حالة الكترود على شكل قضيب:

$$\frac{R}{R_G} = 1 - \frac{L}{r \log_e \frac{3L}{d}} \qquad \text{(ب - ٩)}$$

المعادلة (ب ـ ٩) هي معادلة مقربة لهذه النسبة ولا تعطي نتائج صحيحة للمسافات القريبة جداً من الالكترود (حتى حوالي ١ متر). نضع الآن $r = 2m$ مرة و $r = 10m$ مرة أخرى وذلك لقضيب طوله $L = 3m$ وقطره $d = 16mm$ نحصل على ما يأتي:

$$\frac{R}{R_G} = 0.7631 \qquad (\text{عند } r = 2)$$

$$\frac{R}{R_G} = 0.9526 \qquad (\text{عند } r = 10)$$

أي أن أكثر من ٧٥٪ من المقاومة الكلية لالكترود التأريض قد تحققت في حيز من الأرض لا يزيد عن مترين من الالكترود. كما أن أكثر من ٩٥٪ من تلك المقاومة قد تحقق حتى حدود عشرة أمتار من الالكترود. ومن هذا فإنه يمكن تحسين مقاومة التأريض في حالات المقاومية العالية للتربة عن طريق المعالجة الكيماوية في المنطقة المجاورة من الالكترود حيث أنها هي العامل المؤثر في هذا الموضوع. راجع الجدول ٢ ـ ١ والبند ٢ ـ ٣ ـ ٤ لمزيد من الدراسة. ونلاحظ أيضاً أنه عند استخدام الكترودَي تأريض فيجب أن تكون المسافة بينهما أكبر ما يمكن بقدر الامكانيات ومساحة الأرض المتاحة. إن ذلك يمنع تداخل منطقتي المقاومة للالكترودين فيما بينهما، حيث يؤدي هذا التداخل إلى رفع جهد الالكترودات وخفض كفاءة عملية التأريض.

هناك حقيقة أخرى تتضح من المعادلتين (ب - ٢) و (ب - ٥) وهي أن إستخدام الكترودات على شكل قضبان أفضل بكثير من الالكترودات نصف الكروية وذلك من وجهة النظر الإقتصادية. إن مقاومة الالكترود المطلقة تتناسب عكسياً مع نصف قطر الالكترود إذا كان على شكل نصف كروي، أي تتناسب عكسياً مع الجذر التكعيبي لحجم الالكترود. وعلى هذا فإذا أردنا أن نخفض مقاومة مثل هذا الالكترود إلى النصف مثلاً فيجب علينا أن نزيد الحجم بنسبة $٢^٣$، أي إلى ثمانية أضعاف الحجم الأصلي. أما في حالة الالكترود الذي على شكل قضيب فإن المقاومة الكلية للالكترود تتناسب عكسياً مع طوله. وعلى ذلك فإن تخفيض المقاومة إلى النصف يتطلب زيادة طول الالكترود إلى الضعف دون أي زيادة في نصف قطر الالكترود حيث أن تأثيره صغير ويمكن إهماله (راجع البند ٢ - ٣ - ٤ والشكل ٢ - ٢٢).

ب - ٣ تصميم حصيرة التأريض Grounding mat

يفضل استخدام حصيرة التأريض في المنشآت التي لها تيار قصر أرضي مرتفع حيث تكون أكبر تأثيراً في خفض الجهد في فترات القصر. ذكرنا في البند ٢ - ٣ - ٢ - ٤ العوامل الواجب أخذها في الإعتبار عند تصميم حصيرة التأريض. لا توجد طريقة واحدة بعينها تستخدم في التصميم، وعلى ذلك فإننا نورد في هذا البند إحدى الطرق المعتمدة عالمياً في هذا المجال. تتم عملية التصميم باتباع الخطوات الآتية وذلك بالترتيب المعطى:

١ - دراسة لخواص التربة ومقاوميتها.

٢ - دراسة عامة لتيارات القصر لتحديد أقصى تيار قصر أرضي. وتتم هذه الدراسة على جميع أنواع القصر الأرضي تبعاً لما هو معطى بالملحق أ.

٣ - عمل تصميم أولي لتركيبات نظام التأريض.

٤ - حساب مقاومة التأريض على أساس الخطوة السابقة.

٥ - حساب أقصى ارتفاع في جهد الشبكة في فترة القصر.

٦ - حساب أقصى جهد خطوة عند محيط الحصيرة.

٧ - حساب جهد الخطوة وجهد اللمس الداخليين.

٨ - دراسة هذه الجهود والنقط ذات الخطورة الخاصة.

٩ - تعديل وتحسين التصميم الأولي المعطي في الخطوة ٣ وذلك تبعاً للنتائج التي حصلنا عليها من الخطوات ٦ و ٧ و ٨.

١٠ - بناء وتركيب نظام التأريض.

١١ - عمل قياسات ميدانية على الطبيعة لقياس مقاومة التأريض بعد إنشاء منظومة التأريض، ويمكن كذلك عمل قياسات لجهد اللمس وجهد الخطوة.

١٢ - مراجعة الخطوات ٥ و ٦ و ٧ و ٨ تبعاً لنتائج القياسات وعمل التعديلات اللازمة إذا لزم الأمر.

١٣ - إضافة الكترودات تأريض على المحيط الخارجي للحصيرة في بعض الحالات ثم عمل واعتماد القياسات والتصميمات النهائية.

سوف نعتمد العلاقات الآتية في خطوات التصميم*:

$$R_G = \frac{\rho_1}{4r} + \frac{\rho_1}{L} \quad \text{......} \quad (ب - ١٠)$$

$$V_{sp} = \frac{165 + \rho_2}{\sqrt{t}} \quad \text{......} \quad (ب - ١١)$$

$$V_{tp} = \frac{165 + 0.25\rho_2}{\sqrt{t}} \quad \text{......} \quad (ب - ١٢)$$

$$V_m = \frac{K_m . K_i . \rho_1 . I_f}{L} \quad \text{......} \quad (ب - ١٣)$$

$$V_G = \frac{K_s . K_i . \rho_1 . I_f}{L} \quad \text{......} \quad (ب - ١٤)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\log_e \frac{D^2}{16hd} - \log_e \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8}\right)\right] \quad \text{......} \quad (ب - ١٥)$$

---

* توجد بعض الاختلافات الطفيفة في تلك العلاقات بين المراجع المعتمدة، وقد اخترنا تلك الموجودة معنا هنا. وتأثير تلك الخلافات قليل، وهذا يرجع إلى أن معظم تلك العلاقات هي علاقات تجريبية على أساس فروض بعينها.

$$K_s = \frac{1}{\pi}\left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \ldots\right) \quad \ldots\ldots\ldots \tag{ب - ١٦}$$

$$L_a = \frac{K_m . K_i . \rho_1 . I_f . \sqrt{t}}{165 + 0.25\,\rho_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \tag{ب - ١٧}$$

R_G : مقاومة الحصيرة الأرضية (أوم).

L : الطول الكلي للموصلات المدفونة (متر).

r : نصف قطر صفيحة دائرية مساحتها تكافىء مساحة الأرض المغطاة بالحصيرة (متر).

V_{sp} : جهد الخطوة المسموح به (ڤولت).

$v_s t$: جهد اللمس المسموح به (ڤولت).

v_m : جهد الحصيرة (ڤولت).

I_f : تيار القصر (أمبير).

ρ_1 : مقاومية التربة (أوم. متر).

ρ_2 : مقاومية سطح الأرض تحت القدم (أوم. متر).

D : المسافة بين موصلات التأريض (متر).

d : قطر موصلات التأريض (متر).

h : عمق الدفن (متر).

t : الزمن الكلي اللازم لفصل الدائرة من لحظة حدوث القصر حتى لحظة إتمام فتح الدائرة (ثانية).

L_a : الطول الفعلي للموصلات المدفونه (متر).

K_m : معامل الحصيرة.

K_s : معامل الخطوة.

K_i : معامل عدم الإنتظام.

نعطي فيما يلي نموذجاً عددياً للتصميم.

المطلوب عمل التصميم المناسب لحصيرة تأريض خاصة بمحطة محولات تبعاً للمعلومات المتاحة الآتية:

طول الحصيرة: ١٣٠ متراً.
عرض الحصيرة: ٦٠ متراً
عمق موصلات التأريض المدفونة: ٠,٣ متر.
مقاومية التربة: ١٠٠٠ أوم. متر.
مقاومية سطح التربة الملامس للقدم: ٣٠٠٠ أوم. متر.
جهد الدائرة: ٢٢٠ ك.ف
مفاعلة الدائرة المكافئة: ($x_1 + x_2 + x_0 = 60$ ohms).
مقاومة الدائرة المكافئة: مهملة.
زمن فصل القصر: ٨ دورات (٠,١٦ ثانية).

خطوات التصميم

$$\pi r^2 = 130 \times 60$$

$$r = 50 \quad \text{m.}$$

بفرض الطول الكلي للموصلات المدفونة يساوي ٣٠٠٠ متر (فرض أولي)

$$R_G = \frac{1000}{4 \times 50} + \frac{1000}{3000}$$

$$R_G = 5.33 \quad \text{ohms}$$

تيار القصر المتماثل دون العابر I'' يساوي

$$I'' \cong \frac{3V}{X_1 + X_2 + X_0 + 3R_G}$$

$$= 3 \times \frac{220 \times 10^3}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{60}$$

$$I'' = 6400 \text{ A}$$

معدل إضمحلال تيار القصر يساوي ١,٢ (من الملحق حـ). وعلى فرض معدل في النموّ يساوي ١,٣ فإن تيار القصر يصبح:

$$I'' = 1.2 \times 1.3 \times 6400$$

$$I'' = 10000 \text{ A.}$$

وعلى فرض أن موصلاً واحداً يمكنه حمل التيار الكلي فإنه يمكن الحصول من الجدول ٢ ـ ٨ على مساحة مقطع الموصل على أساس فترة دوام للقصر مقدارها ١٦ , ٠ ثانية.

مساحة المقطع $٢,٥ \times ١٠^{-٣}$ مم^{٢} لكل أمبير
مساحة المقطع الكلي = $٢,٥ \times ١٠^{-٣} \times ١٠٠٠٠$ = ٢٥مم^{٢}.

نختار لذلك موصلاً نحاسياً قطره ٤ , ١٠مم وذلك لمراعاة الاعتبارات الميكانيكية.

نفرض الآن أن الموصلات سوف توضع على مسافات بينية مقدارها ٥ متر طولاً وعرضاً.

العدد الكلي للموصلات المتوازية:

$$\frac{60}{5} + 1 = 13$$

وبالتعويض في المعادلة (ب ـ ١٥)، حيث

$D = 5$ m.
$d = 0.010$ m.
$h = 0.3$ m.

ينتج أن

$$K_m = 0.5230$$

لإيجاد قيمة K_i نحسب أولاً عدد الدارات (meshes) المقفولة في الحصيرة فنجدها ٣١٢، ثم من الملحق د نجد أن:

$$K_i = 1.49$$

ثم بالتعويض في المعادلة (ب ـ ١٦) ينتج أن الطول الفعلي الكلي للموصلات المدفونة هو:

$L_a = 3400$ meters.

وهي قيمة قريبة من تلك المفروضة في البداية ($L = 3000$ m.). وبإعادة تعديل وضع الشبكة بحيث تحتوي على ١٣ صفاً في العرض و٢٧ صفاً للطول مع إعتبار ٩٠ متراً للوصلات فإن الطول الكلي للموصلات يصبح :

$$L_a = 130 \times 13 + 60 \times 27 + 90$$

$$L_a = 3400 \quad \text{meters}$$

يمكن بعد ذلك حساب مقاومة التأريض النهائية

$$R_G = \frac{1000}{4 \times 50} + \frac{1000}{3400}$$

$$R_G = 5.28 \quad \text{ohms.}$$

وعلى اعتبار أن تياراً مقداره ٩ مللي أمبير كأكبر قيمة للتيار يمكن للإنسان أن يتحملها لفترة زمنية طويلة (راجع جدول ٣ ـ ١)، وبالرجوع إلى الباب الثالث فإن أقصى تيار دائم في الجسم يجب أن يحقق العلاقة الآتية :

$$I_f < (1000 + 1.5\,\rho_2)\,(0.009)\,\frac{L}{K_m \cdot K_i \rho_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (17 - b)$$

وبذلك فيجب أن يتم اختيار وسيلة الحماية من الخطأ الأرضي بحيث يمكنها أن تفصل الدائرة على تيار خطأ أقل من تلك القيمة السابقة.

بالتعويض في المعادلة (ب ـ ١٧) نجد أن :

$$I_f = 218 \quad \text{A}$$

وعلى هذا يتم ضبط أجهزة الحماية والفصل بحيث تستجيب لتيارات قصر أقل من تلك القيمة.

ملحق جـ

معامل الإضمحلال لفترات الصدمات الكهربية

يعطي الجدول جـ ـ ١ معاملات الإضمحلال المستخدمة لحساب قيمة تيار القصر الذي تتم على أساسة تصميمات منظومات التأريض. والمعامل يعتمد على الفترة الزمنية للصدمة والخطأ.

جدول جـ ـ ١ معامل الإضمحلال للفترات المختلفة للصدمة والخطأ

فترة الصدمة والخطأ (ثانية)	معامل الإضمحلال
٠,١	١,٢٥
٠,٢٥	١,١
٠,٥ أو أكثر	١,٠٠

ملحق د

معامل عدم الإنتظام

يستعمل معامل عدم الإنتظام K_i في تصميم حصائر التأريض كما هو موضح بالملحق ب. ويمكن القول أن قيمة معامل عدم الإنتظام الصحيحة تتراوح من ١ إلى ٢ وربما أكثر من ذلك وذلك تبعاً للشكل الهندسي لحصيرة التأريض. بين الجدول د - ١ القيم المستخدمة لهذا المعامل.

جدول د - ١ معامل عدم الانتظام

عدد الدارات (mesh)	معامل عدم الانتظام
١	١
٤	١,١٤
١٦	١,٤٧
٦٤	١,٤٨
١٠٠	١,٤٩
١٥٠ وأكثر	١,٤٩

بيانات عن الموصلات المستخدمة في التأريض والحماية من الصواعق

هـ ـ ١ مساحة الموصل

تُقاس مساحة الموصل في النظام الأمريكي بما يأتي :

أ ـ المقياس الأمريكي للسلك American Wire Gage (AWG) .

ب ـ المل الدائري Circular Mil (CM)

وعلاقتا التحويل المستخدمتان هما

$$1 \text{ Mil} = 0.0254 \text{ mm.}$$

$$1000 \text{ CM} = 1\text{MCM}$$

$$= 0.5067 \text{ mm}^2$$

يعطي الجدول هـ ـ ١ العلاقة بين النظام الأمريكي للقياس والنظام المتري .

هـ ـ ٢ الخواص الكهربية

حددت اللجنة الدولية الكهروتقنية IEC المقياس العالمي لمقاومية النحاس المخمّر (الملدّن) annealed على أساس أن نحاسا مقاوميته ١,٧٢٤ ميكروأوم . سم عند درجة حرارة ٢٠°م تكافىء مقاومية مقدارها ١٠٠٪ . تُقاس مقاومات جميع الموصلات كنسبة مئوية من تلك القيمة .

جدول هـ - ١ مساحات الموصلات بالمقاييس المختلفة

مساحة المقطع AWG أو MCM	مساحة المقطع Cir.Mils	مساحة المقطع mm^2
٢٠	١٠٢٤	٠,٥١٩
١٨	١٦٢٠	٠,٨٢٣
١٦	٢٥٨٠	١,٣١
١٤	٤١١٠	٢,٠٨
١٣	٥١٩٧	٢,٦٣
١٢	٦٥٣٠	٣,٣١
١١	٨٢٢٧	٤,١٧
١٠	١٠٣٨٠	٥,٢٦
٩	١٣٠٨٠	٦,٦٣
٨	١٦٥١٠	٨,٣٧
٧	٢٠٩١٢	١٠,٦
٦	٢٦٢٤٠	١٣,٣
٥	٣٣١٤٣	١٦,٨
٤	٤١٧٤٠	٢١,٢
٣	٥٢٦٢٠	٢٦,٧
٢	٦٦٣٦٠	٣٣,٦
١	٨٣٦٩٠	٤٢,٤
٠/١	١٠٥٦٠٠	٥٣,٥
٠/٢	١٣٣١٠٠	٦٧,٤
٠/٣	١٦٧٨٠٠	٨٥,٠٠
٠/٤	٢١١٦٠٠	١٠٧

جدول هـ ـ٢ الخواص الكهربية للمعادن

المعدن	التوصيلية النسبية (النحاس ١٠٠)	المقاومية عند ١٠°م أوم متر × $١٠^{-٨}$	المعامل الحراري للمقاومة عند ٢٠°م
الفضة	١٠٦	١,٦٢٦	٠,٠٠٤١
النحاس المخمر	١٠٠	١,٧٢٤	٠,٠٠٣٩
النحاس الصلد	٩٧	١,٧٧٧	٠,٠٠٣٩
النحاس المقصدر	٩٥ ـ ٩٩	١,٧٤١ـ١,٨١٤	٠,٠٠٣٩
الألمنيوم الطري	٦١	٢,٨٠٣	٠,٠٠٤٠
الألومنيوم ($^{١}/_{٢}$صلد ـ صلد)	٦١	٢,٨٢٦	٠,٠٠٤٠
الصلب الطري	١٢	١٣,٨	٠,٠٠٤٥
الرصاص	١٨	٢١,٤	٠,٠٠٤٠
الصوديوم	٣٥	٤,٩٢٦	٠,٠٠٥٤

هـ ـ ٣ الخواص الفيزيائية

يعطي الجدول هـ ـ ٣ أهم الخواص الفيزيائية للنحاس والألومنيوم.

جدول هـ ـ ٣ الخواص الفيزيائية للنحاس والألومنيوم

الخاصية	الوحدة	النحاس	الألمنيوم
الكثافة عند ٢٠°م	كجم/م^{٣}	٨٨٩٠	٢٧٠٣
معامل التمدد الحراري لكل °م	× $١٠^{-٦}$	١٧	٢٣
نقطة الانصهار	°م	١٠٨٣	٦٥٩
أقصى إجهاد شد	م.ن./م^{٢}	٢٢٥	٧٠ـ٩٠

ملحق ز

أبعاد تجهيزات منظومات الحماية من الصواعق تبعا للمواصفات البريطانية

تعطي الجداول من ز ـ ١ إلى ز ـ ٤ أقل أبعاد مسموح بها في منظومات الحماية من الصواعق البرقية، وذلك تبعاً للمواصفة البريطانية BS6651 (1985):

جدول ز ـ ١ الدائرة الهوائية

التجهيز	الأبعاد مم	المساحة مم^{٢}
شريط الومنيوم أو نحاس أو صلب مجلفن.	٢٠ × ٢٥	٥٠٠
قضبان الومنيوم أو سبائك الومنيوم أو نحاس أو برونز فسفوري أو صلب مجلفن.	٨,٠ (قطر)	٥٠

جدول ز - ٢ الموصلات معلقة

التجهيـــز	الأبعاد مم	المساحة مم^٢
الومنيوم مجدول.	٣/٧	٥٠
نحاس مجدول.	١,٨/١٩	٥٠
الومنيوم مجدول ومقوى بالصلب.	٣/٧	٥٠
صلب مجلفن مجدول.	٣/٧	٥٠

جدول ز - ٣ الموصلات الهابطة

التجهيـــز	الأبعاد مم	المساحة مم^٢
الومنيوم أو نحاس أو صلب مجلفن (قطع).	٢,٥×٢٠	٥٠
الومنيوم أو سبائك الومنيوم أو نحاس أو صلب مجلفن (قضبان).	٨,٠ (قطر)	٥٠

جدول ز - ٤ الشبكة الإرضية

التجهيـــز	الأبعاد مم	المساحة مم^٢
صلب أو ستنيتي	١٤ (قطر)	١٥٣
قطع نحاس أو صلب مجلفن	٢,٥×٢٠	٥٠
قضبان نحاس أو صلب مجلفن	٨,٠ (قطر)	٥٠
قضبان نحاس صلد للدفع المباشر في التربة الطرية.	٨,٠ (قطر)	٥٠
قضبان نحاس صلد مخمر أو أسلاك مصمتة للدفع غير المباشر أو الدفن في التربة.	٨,٠ (قطر)	٥٠
قضبان للتربة القاسية	١٢ (قطر)	١١٣
صلب مجلفن أو ملبس بالنحاس للتربة القاسية	١٤ (قطر)	١٥٣